

Étienne Klein

Le Temps



Flammarion

Étienne Klein

LE TEMPS

Un exposé pour comprendre

Un essai pour réfléchir

Flammarion

Étienne Klein

Le Temps

Flammarion

© Flammarion 1995

ISBN Epub : 9782081324978

ISBN PDF Web : 9782081324985

Le livre a été imprimé sous les références :
ISBN : 9782080352521

Ouvrage numérisé et converti par [Pixellence/Meta-systems](#)
(59100 Roubaix)

Présentation de l'éditeur

A la fois évident et impalpable, substantiel et fuyant, le temps s'impose dans toutes les disciplines sans être l'apanage d'aucune.

Avec le talent de vulgarisateur qu'on lui connaît, Etienne Klein nous entraîne du temps de la physique à la philosophie du temps.

Le Temps

Étienne Klein. Physicien à la Direction des sciences de la matière du Commissariat à l'énergie atomique (CEA), Étienne Klein a participé à divers grands projets, en particulier à la mise au point du procédé de séparation isotopique par laser, à l'étude d'un accélérateur à cavités supraconductrices et, plus récemment, à l'étude du futur grand collisionneur de particules européen, le *Large Hadron Collider* (LHC).

Il donne des cours de physique quantique et de physique des particules à l'École centrale de Paris, et dispense un enseignement de philosophie des sciences, en collaboration avec Jean-Michel Besnier. Il rédige actuellement une thèse de doctorat dans cette matière.

Il a fondé, avec l'astrophysicien Marc Lachièze-Rey, l'association Kronos, qui regroupe des chercheurs de toutes disciplines s'intéressant à la question du temps.

Depuis 1992, il préside la commission Physique et Médias de la Société française de physique. C'est à ce titre qu'il a organisé avec Michel Spiro et Gilles Cohen-Tannoudji un colloque intitulé « Le temps et sa flèche », qui s'est tenu au ministère de la Recherche et de l'Enseignement supérieur le 8 décembre 1993.

Ses principales publications destinées au grand public sont : *Conversations avec le Sphinx : les paradoxes en physique*, Le Livre de poche, collection « Biblio Essais », Hachette, 1994.

Regards sur la matière : des quanta et des choses, en collaboration avec Bernard d'Espagnat, Fayard, 1993.

Sous l'atome, les particules, collection « Dominos », Flammarion, 1993.

La première fois qu'apparaît un mot relevant d'un vocabulaire spécialisé, explicité dans le glossaire, il est suivi d'un *

Avant-propos

« Le temps est un feu qui me dévore.
Mais je suis le feu. »

Jorge Luis BORGES.

Notre expérience primordiale nous fait éprouver la sensation d'un temps sans lequel notre existence n'aurait ni texture ni vécu, et auquel nous avons le sentiment d'être inéluctablement soumis. Irréusable est notre expérience d'un temps tyrannique qui nous porte jusqu'à la mort. C'est sans doute pourquoi les hommes ont toujours tenté, sans grand succès d'ailleurs, d'élaborer un discours cohérent sur le temps.

Il n'y a qu'à voir la place énorme, et unique, que ce dernier occupe dans la littérature, dans l'art, dans la chanson de toutes les époques. Et il intervient dans de si nombreuses expressions du langage courant qu'il fait bel et bien partie, pensons-nous, de nos concepts familiers. Le temps est de ces êtres quasi domestiques que nous croyons pouvoir apprivoiser.

Chacun comprend de quoi on parle quand on parle du temps, sans qu'on le désigne davantage. Cela devrait suffire à résoudre une bonne fois pour toutes le problème qu'il pose, d'une façon claire et distincte. Mais il faut prendre garde au fait que les concepts usuels sont souvent les plus mystérieux. Cela est particulièrement vrai du temps. Chacun sent bien que, sous ses allures familières et son innocence, il

n'est pas une chose comme les autres, et qu'on n'en finira jamais de l'interroger. Saurions-nous seulement définir le temps autrement que par des métaphores de lui-même ? Telle celle, tant rebattue depuis l'empereur philosophe Marc Aurèle (121-180), du « fleuve qui coule et que formeraient les événements » ?

« La méditation du temps est la tâche préliminaire à toute métaphysique », prévenait Gaston Bachelard dans *L'Intuition de l'instant*. C'est bien ce qui rend la métaphysique si ardue car, par quelque bout qu'on la prenne, l'analyse du temps pose inmanquablement plusieurs difficultés, toutes sévères.

La première est que nous ne pouvons pas nous mettre en retrait par rapport au temps, comme nous le ferions pour un objet ordinaire. Nous pouvons certes le mesurer, mais non l'observer en le mettant à distance : il nous affecte sans cesse. Nous voudrions nous arrêter, et le regarder couler comme on regarde passer une rivière, en restant sur la rive, sans prendre part à son flux. Mais c'est tragiquement impossible : nous sommes inexorablement *dans* le temps et nous ne pouvons pas en sortir. Le temps, pour nous, n'a pas d'extérieur.

Nous ne pouvons pas non plus *saisir* le temps. Le mot « maintenant » a beau être le participe présent du verbe « maintenir » (c'est-à-dire « tenir en main »), nul ne peut retenir ni appréhender le temps, pas plus qu'une main plongée dans un fleuve ne peut bloquer son flux. Il n'y a donc pas, en matière de temps, de *main tenant*, comme dit Michel Serres. Pendant que nous pensons, le temps entraîne notre pensée en même temps que nous-mêmes. Il ne peut s'empêcher d'aller, il ne sait que fuguer, et c'est le propre du temps. Nul ne peut l'arrêter ni le suspendre, il n'est rien pour lui qui fasse office de feu rouge ou de porte-manteau, au grand regret d'Alphonse de Lamartine et de quelques autres.

Une troisième difficulté vient de ce que le temps n'est une « matière » à aucun de nos cinq sens. Il n'est pas perceptible en tant que phénomène brut, même si l'homme est certainement le plus « temporel » des animaux, celui qui a le plus conscience du temps qui passe. Seuls des êtres doués, au minimum, de mémoire sont capables d'appréhender le passage du temps (un être sans mémoire n'aurait pas plus idée de la durée qu'un aveugle n'a idée de la couleur) ; mais la mémoire, même si elle retient une part du passé dans le présent, ne suffit pas à faire du temps une matière palpable. De même, ni l'intuition ni l'imagination ne suffisent à rendre l'avenir tangible « à l'avance ».



Le temps a beau être impalpable, rien n'a lieu hors de lui.

Le temps, fait d'instants qui se succèdent au sein même de leur disparition, est un mélange de réalité frissonné et de virtualité stable.

Chaque activité humaine a un tempo propre, qui définit son rapport particulier au temps.

La musique est l'exemple qui vient le plus vite à l'esprit. Ici, la baguette de Léonard Bernstein rythme la promenade de l'archet tenu par Mstislav Rostropovitch.

Les regards mutuels scandent les synchronismes.

Ph. © Marc Enguerand.

Enfin, le temps se présente à nous d'une façon presque toujours ambiguë, déconcertante et parfois contradictoire. Il est à la fois évident et impalpable, substantiel et fuyant, familier et mystérieux, et, bien que sa direction soit « fléchée », comme disent les physiciens, il demeure un objet introuvable. Alors, comment rendre raison du temps ? Il semble bien qu'on ne puisse le faire sans tomber aussitôt dans de terribles paradoxes, comme nous le verrons dans la seconde partie de ce livre.

Ces ambiguïtés du temps n'empêchent pas que, dans leurs interrogations sur l'univers et sur l'homme, les scientifiques de toutes disciplines sont sans cesse confrontés au temps et à ses caprices, voire à ses ténèbres. Dans un premier temps, nous parlerons surtout des physiciens. Il peut sembler curieux d'associer le temps et la physique. Celle-ci cherche en effet, sans se l'avouer toujours, à éliminer le temps. Car le temps, c'est le variable, l'instable, l'éphémère, tandis que la physique, elle, est à la recherche de rapports qui soient soustraits au changement. Lors même qu'elle s'applique à des processus qui ont une histoire ou une évolution, c'est pour y discerner soit des substances et des formes, soit des lois et des règles indépendantes du temps. Voilà pourquoi la physique prétend à l'immuable et à l'invariant, ou du moins au réversible. Dans l'esprit de beaucoup de ceux qui la pratiquent, son but reste bel et bien de ramener le changeant au permanent en établissant des lois éternelles, c'est-à-dire affranchies du temps, à partir de phénomènes

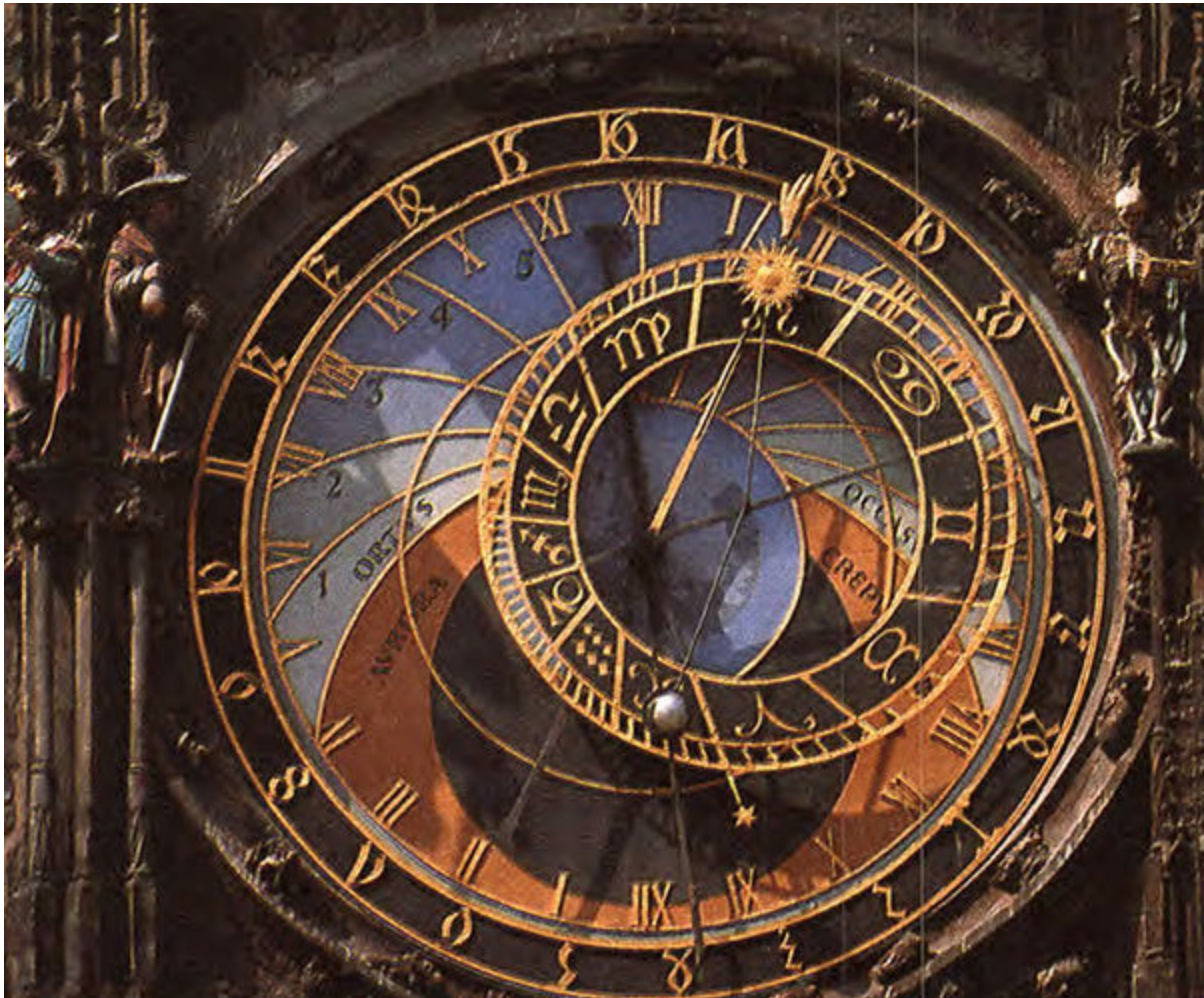
qui, eux, sont passagers. Quiconque recherche la vérité ne doit-il pas viser l'intemporel ?

Pourtant, dans sa pratique aussi bien que dans ses concepts, la physique se heurte au temps. Elle le fait avec d'autant plus de violence qu'en son sein même le temps revêt plusieurs facettes. Pour se rendre compte de la façon dont le temps provoque les physiciens, il suffit de reprendre la métaphore du fleuve citée plus haut (« Le temps est un fleuve qui coule ») et d'extraire les notions premières qu'elle cache ou véhicule. Cette image évoque les notions d'écoulement, de succession, de durée, d'irréversibilité (« Car on ne peut entrer deux fois dans le même fleuve », comme disait Héraclite). On voit qu'elle renvoie à des symboles qui font partie du questionnement des physiciens. Est-il question d'écoulement ? Eh bien, les physiciens se demandent à ce propos si l'écoulement du temps est ou non régulier. Le temps est-il rigide ou est-il élastique ? Nous verrons que la physique classique, sur ce point, ne répond pas comme la relativité, Albert Einstein étant nettement plus souple qu'Isaac Newton. Est-il question de durée ? Les physiciens, eux, aimeraient savoir si le temps a, telle une corde, des extrémités : y a-t-il, se demandent-ils, un début ou une fin du temps ? C'est bien là le problème de la cosmologie*, qui étire puis contracte temporellement l'univers entre un big-bang* assez bien assuré et un big-crunch* plus incertain (et que les astrophysiciens ont la sagesse de ne pas dater). Est-il question d'irréversibilité, c'est-à-dire d'une impossibilité de remonter le cours du fleuve temps ? Les physiciens se demandent de leur côté si l'écoulement du temps peut ou non changer de direction : le temps est-il ou non « fléché » vers l'avenir, comme ils disent ?

C'est au physicien anglais Arthur Eddington (1882-1944) que le temps doit d'être équipé de cet emblème - la flèche - que la mythologie attribuait jusque-là à Éros, le dieu de l'Amour, souvent représenté comme un enfant ailé qui

blesse les cœurs de ses flèches aiguës. En l'occurrence, cette flèche symbolise non plus le désir amoureux, hélas, mais le sentiment qu'a tout être humain d'une fuite inexorable et irréversible du temps (ce mot « fuite » suggère à lui seul qu'en matière de temps nous n'avons droit qu'à un aller simple). Nous examinerons comment chaque domaine de la physique recense tant bien que mal sa propre flèche du temps*, et nous verrons si les physiciens sont parvenus à faire jaillir un temps unique de leurs équations. Dans la seconde partie, nous sortirons du cadre strict de la science pour évoquer d'autres aspects de la question du temps, prise dans toute son épaisseur.

LA PHYSIQUE ET LE TEMPS



Nous mesurons le temps. Saurions-nous le définir ?

Chacun sent bien que, sous ses allures familières et innocentes, le temps n'est pas une chose comme les autres, et qu'on n'en finira jamais de l'interroger. Le temps n'est-il qu'une illusion ? Est-il unique ? Est-il universel ? À-t-il une flèche, ou seulement l'apparence d'une flèche ? Que contient au juste le petit carquois du temps ?

Ph. © J.-P. Lescourret / Explorer.

Chronos et temps

Les minutes s'écoulaient lentement, mais les heures passaient vite.

Pierre MAC ORLAN, *La Bandera*.

Partons d'une observation de tous les jours : il existe manifestement une opposition entre le temps physique et le temps subjectif, ou, si l'on préfère, entre le temps des horloges et le temps de la conscience. Le premier, que nous appellerons du mot grec *chronos*, est censé être objectif, il ne dépend pas de nous, il est réputé uniforme, nous savons d'ailleurs le chronométrer. C'est le temps qu'affichent nos montres, celui qui rythme notre emploi du temps. Depuis le 13 octobre 1967, son étalon, la seconde, est scrupuleusement défini comme la durée de 9 192 631 770 périodes de l'onde électromagnétique émise ou absorbée par un atome de césium 133 lorsqu'il passe d'un certain niveau d'énergie à un autre. (La rigueur scientifique, on le notera au passage, c'est tout de même quelque chose...)

Dans la suite, c'est par le mot latin *tempus* que nous désignerons le second temps que nous avons évoqué, le temps éprouvé ou psychologique, celui que l'on mesure « de l'intérieur de soi ». Il ne s'écoule pas uniformément. « Il y a des moments qui durent longtemps », dit Arletty dans le film de Marcel Carné *Hôtel du Nord*. D'autres passent au contraire très vite. C'est que la fluidité du temps psychologique est variable, au point que la notion même de

durée éprouvée n'a qu'une consistance très relative. Il n'y a vraisemblablement pas deux personnes qui, dans un temps donné, comptent un nombre égal d'instants. D'autant qu'il a été prouvé par diverses expériences que notre estimation des durées varie notablement avec l'âge, et surtout avec la signification des événements qui se sont produits. Le temps psychologique est un caoutchouc. À l'instar de son homonyme météorologique, il a ses rythmes et ses variations, ses allures et ses humeurs, bref, une phénoménologie. En raison d'une malignité intrinsèque de la condition humaine, une minute passée à attendre qu'un feu rouge devienne vert semble plus longue (surtout si l'on est en retard) qu'une minute passée à converser joyeusement avec un ami (surtout si celui-ci est du sexe opposé). Vladimir Jankélévitch remarquait que, bizarrement, plus le temps est vide et plus il nous pèse, ce qui suffit à différencier ce temps des objets ordinaires de la mécanique. C'est d'ailleurs un truisme de dire que le temps de l'ennui est interminable, que celui de l'impatience est lent mais compact, que celui de la joie est intense et comme arrêté.



Le temps coule rarement comme on voudrait.

Une minute alourdie d'ennui semble plus interminable qu'un tour de cadran. Une vie trépidante empêche au contraire de voir le temps passer. Le temps tel que nous l'éprouvons est rarement en phase avec la cadence monotone et invariable des pendules. C'est pourquoi nous portons une montre.

Ph. © Robert Doisneau/Rapho.

Quel écolier n'en a fait l'expérience, avant même l'âge des tachycardies adolescentes ?

Ces variations subjectives du temps perçu, qui se traîne s'il est vide de dessein ou bien s'accélère s'il en est rempli, ont inspiré de nombreux auteurs (Primo Levi, par exemple, a écrit une nouvelle succulente baptisée *Échec au temps*, dans laquelle il raconte l'invention et les effets d'un produit pharmaceutique, le Parachrone, qui permet à chacun de modifier, à volonté, son propre sentiment subjectif du temps, allongeant les périodes de temps agréables et abrégeant les autres). Elles sont parfois si amples qu'il paraît difficile de concilier ces multiples perceptions du temps. Comment unifier *chronos* et *tempus* ? Quels liens existent entre eux ? Est-il seulement légitime de vouloir mettre en rapport ce qui est invariable avec ce qui est élastique ? C'est ici que la physique a son mot à dire.

Comment la physique prend-elle le temps ?

Oh ! là, là ! Oh ! là, là !
Je vais être en retard !
Le lapin aux yeux roses dans *Alice au pays des merveilles*.

Le temps s'incarne en physique sous la forme du fameux paramètre t , qui est un nombre réel. La première mathématisation du temps consiste en effet à dire qu'il n'a qu'une dimension. Un seul nombre suffit à déterminer une date. De ce fait, le temps a nécessairement une structure ordonnée puisque, sur une droite, un point se situe nécessairement avant ou après un autre point (cet ordre ne serait pas possible si le temps avait plusieurs dimensions). Contrairement à celle de l'espace, la topologie* du temps est donc très pauvre. Elle n'offre que deux variantes, la ligne et le cercle, c'est-à-dire le temps linéaire, qui va de l'avant, et le temps cyclique, qui fait des boucles. Ce dernier, favorisé par le caractère magique du cercle, a toujours prévalu dans les mythes, comme dans celui de l'éternel retour qui se

trouvait déjà chez les Grecs (stoïciens) et qui séduisit des philosophes comme Auguste Comte ou Friedrich Nietzsche. Pour Nietzsche, par exemple, le devenir revient sur soi pour former un grand cycle où tout réapparaît éternellement, le meilleur comme le pire. Il faut donc vivre, selon lui, de façon à désirer revivre ce que nous avons déjà vécu, à vouloir l'avenir plutôt qu'à le subir. Mais cette conception répétitive du temps, aussi séduisante ou consolatrice soit-elle, est aujourd'hui délaissée par la physique, car elle viole ce qu'on appelle le principe de causalité (sauf si celui-ci est appliqué à la totalité de l'univers, qui peut alterner dilatations et contractions, c'est-à-dire osciller périodiquement entre des big-bangs et des big-crunches se répétant sans cesse). Nous reviendrons (mais pas éternellement...) sur cette question.

La figuration du temps par une ligne géométrique postule qu'il n'y a qu'un temps à la fois et que ce temps est continu. Elle semble naturelle puisqu'elle s'appuie sur notre expérience intérieure la plus sûre, qui nous présente parfois des événements qui se chevauchent, mais jamais de lacunes : il ne cesse jamais d'y avoir du temps qui passe. Une telle schématisation rend licite un traitement algébrique et simple du temps, qui devrait *a priori* sinon résoudre, du moins occulter tous les problèmes philosophiques qu'il pose par ailleurs. Quoi de plus simple en effet qu'un point glissant sur une ligne droite ? En réalité, les ennuis ne font ici que commencer.

On trouve le paramètre représentant le temps dans toutes les équations de la physique, sous une forme plus ou moins explicite : par exemple, il peut être caché sous forme de variable indépendante dans les notions de vitesse ou d'accélération instantanées. Cette omniprésence du temps dans le formalisme* des théories soulève plusieurs graves questions. D'abord, on peut se demander si elle est la marque d'une universalité du temps, ou bien si elle reflète une juxtaposition de statuts particuliers. Tous ces temps qui apparaissent dans les équations sont-ils identiques ou bien

distincts ? Le temps de la thermodynamique* est-il le même que celui de la mécanique* ou de la cosmologie ? Ensuite, on peut se demander si la présence du temps au sein de la physique n'est pas incongrue dans la mesure où cette dernière tend à nier le temps en faisant appel à des « idéaux immobiles » (principes, lois, théories), sans aucune référence à la notion d'événement daté. Comment la notion de loi universelle* pourrait-elle être compatible avec celle de temporalité ?

Pour répondre à cette dernière question, il faudrait examiner comment le concept d'*histoire*, qui suppose que le monde se modifie au cours du temps, est lié à celui de *loi*, qui évoque au contraire l'immuabilité ou la stabilité. Cela permettrait de comprendre si la physique a vocation à décrire l'immuable, ou bien si au contraire elle doit devenir la législation des métamorphoses. Doit-elle être le formalisme de l'intemporel ou bien le protocole des modifications ? En d'autres mots, faut-il voir le monde plutôt comme un système ou plutôt comme une histoire ? Ce débat n'est pas encore tranché (pourra-t-il l'être un jour ?). La physique d'aujourd'hui demeure douloureusement écartelée entre deux piliers de la pensée grecque : d'un côté Parménide (v. 515 - v. 440 av. J.-C.), le philosophe de l'Être et de l'immobilité fondamentale ; de l'autre, son contemporain Heraclite (v. 550 - v. 480 av. J.-C.), le philosophe du Devenir et de la mouvance. Nulle science n'échappant à ses origines ni n'oubliant ses vieux antagonismes, ce débat n'a cessé d'opposer, à travers les âges, deux camps : d'un côté, celui qui comprend Isaac Newton et Albert Einstein, partisans d'une éradication du temps en physique ; de l'autre, celui qui compte des physiciens comme Ilya Prigogine, persuadés que l'irréversibilité est en fait présente à toutes les échelles de la physique, mais qu'on a eu tort de l'oublier ou de ne pas la voir.

Et si nous suivions la flèche ?

Ma vie s'en allait, mais j'ignorais par où.

Samuel BECKETT, *Molloy*.

Revenons à *tempus* et *chronos*, cette fois pour les comparer. Nous choisirons comme seul critère de comparaison celui de la *réversibilité* (ou de l'*irréversibilité*) du temps. Le temps subjectif est manifestement irréversible. Contrairement à l'espace, censé être isotrope*, il a un sens privilégié d'écoulement. Le passé nous semble écrit, figé. Certes, nous pouvons nous souvenir de lui, mais nous ne pouvons plus le *sentir* passer.

Nulle mémoire ne retrouve le présent du passé puisque tout passé a, par définition, *déjà* vécu. Quant au futur, si tendue que soit notre volonté, il nous paraît incertain, sans attache solide avec le réel, *a priori* multiple, *encore* à vivre. C'est pourquoi, dans la vie courante, passé et futur n'apparaissent pas symétriques l'un de l'autre. Le temps psychologique est fléché.

Paul Claudel écrivait dans *L'Art poétique* que « le temps est le *sens* de la vie ». Sans le démentir, on pourrait aussi bien dire, par contraposition, que « le temps de la vie a un *sens* ».

Qu'en est-il, de ce point de vue de la réversibilité, du temps de la physique, ou plus exactement *des* différentes sortes de temps qu'envisage la physique ? Ont-ils eux aussi un *sens* privilégié d'écoulement ? À quelle profondeur faut-il aller chercher une correspondance des temps respectifs de la science et de l'existence ? Même si cela a de quoi surprendre, ce problème de la flèche du temps n'est pas résolu de manière satisfaisante et unanime : les développements modernes de la physique ont compliqué à la fois la question posée et les réponses qu'on lui donne.

Newton met le temps hors du temps

Voyons, monsieur, le temps ne fait rien à l'affaire.

MOLIÈRE, *Le Misanthrope*.

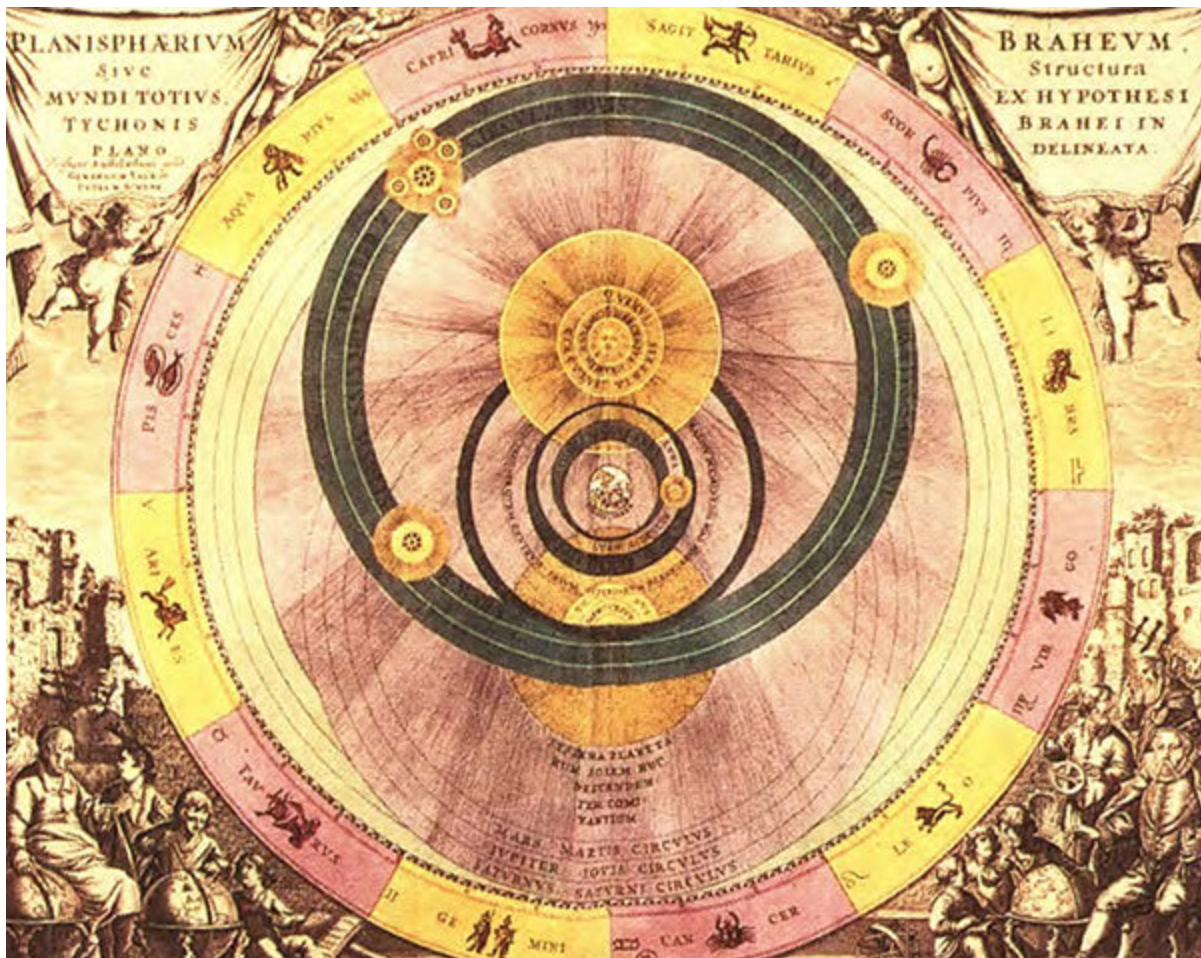
Commençons par le début, ou presque. C'est avec Galilée (1564-1642) qu'est apparu pour la première fois le temps comme grandeur physique fondamentale, par quoi il faut entendre une grandeur mesurable sur toute une famille de systèmes physiques, et par conséquent susceptible d'ordonner des expériences et de les relier mathématiquement. Galilée, dont les travaux seront repris par Newton (1642-1727), réalise finalement le programme qu'avait proposé Aristote au ^{iv}^e siècle avant Jésus-Christ : le temps devient la mesure du mouvement. L'idée était, il est vrai, montée en puissance depuis que les premières horloges mécaniques étaient apparues en Occident, à la fin du ^{xiii}^e siècle, matérialisant le temps par la succession des engrenages de roues ou les oscillations de pendules, et le découpant en unités toujours plus petites (les minutes et les secondes ne furent définies qu'au ^{xiv}^e siècle !). Grâce à cette mathématisation du temps, Galilée put établir que la hauteur de chute libre d'un objet est proportionnelle au carré du temps de sa chute. On reconnaît en cette phrase la loi de la chute des corps dans le vide, qu'on peut aisément transcrire en termes mathématiques.

À partir du ^{xvii}^e siècle, il devint manifeste que les divers types d'horloges donnaient des mesures concordantes de l'écoulement du temps. En principe, donc, toutes les horloges de l'univers pourraient être synchronisées et, à partir de là, battre éternellement au même rythme. Cela n'échappa pas au grand Newton qui, le premier, donna dans ses célèbres *Principia* une définition explicite du temps de la mécanique, la faisant reposer sur un postulat assez complexe. Selon lui, le temps s'écoule uniformément (il n'est pas élastique), il est universel, absolu et invariable, c'est-à-

dire indépendant du référentiel* (l'espace, lui, est inerte : il regarde le temps passer, comme une vache les trains). Le temps newtonien est donc un concept idéalisé, et d'aucuns ont pu gloser sur les résonances platoniciennes de sa définition. Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) fut l'un de ceux qui contestèrent le caractère absolu du temps newtonien, expliquant que ni le temps ni l'espace n'ont d'existence réelle en dehors des objets qu'ils permettent de relier logiquement.

Mais la force de conviction du temps newtonien vient de ce qu'il sous-tend, avec une efficacité remarquable, les principes de la mécanique. Comme chacun sait, cette dernière décrit le mouvement des corps dans l'espace en donnant leurs positions à des instants successifs. Dans ces calculs de trajectoires, le temps apparaît comme un paramètre externe de la dynamique, dont Newton a postulé qu'il s'écoule uniformément, du passé vers le futur, ce qui laisse entendre qu'il va toujours dans le même sens, et donc qu'il est apparemment fléché. Mais, curieusement, ce temps est en réalité réversible puisqu'on explore avec les mêmes méthodes mathématiques le passé et l'avenir. À toute évolution du passé vers l'avenir, la mécanique associe l'existence d'une évolution symétrique de l'avenir vers le passé : il est aussi facile de déterminer les éclipses passées que les éclipses futures et, sur le papier, les planètes pourraient aussi bien tourner à l'envers. Autrement dit, tout ce que la nature fait, elle pourrait le défaire selon le même processus. Le temps newtonien, dans le cas idéal d'un mouvement sans frottement, n'a donc pas de *flèche*. Il ne crée pas, il ne détruit pas non plus. Il ne fait que battre la mesure et baliser les trajectoires. Newton a donc inventé un temps scrupuleusement neutre, sa mécanique réduisant le passé et l'avenir au seul instant présent. C'est ce que remarquait si bien Pierre Simon, marquis de Laplace, dans un texte célèbre datant de 1814, maintes fois commenté à cause de son parfum quasi théologique : « Une intelligence

qui, pour un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée, et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome : rien ne serait incertain pour elle et l'avenir comme le passé serait présent à ses yeux. »



La musique des sphères.

Ou bien l'univers est un système figé, obéissant à des lois immuables, où rien ne se passe vraiment, et alors la physique se doit d'être le formalisme de l'intemporel ; ou bien il relève d'une véritable histoire qui, irréversiblement, le transforme, et alors la science se doit d'expliciter le protocole de ses modifications.

Carte astrale du système de Tycho Brahé, extraite de l' *Atlas céleste* d'Andréa Celatius, 1708.

En physique newtonienne, la notion de simultanéité ne soulève aucune difficulté de principe. Deux expérimentateurs peuvent synchroniser leurs montres : ils n'ont qu'à échanger des signaux lumineux, ce qu'ils peuvent faire instantanément puisque, d'après Newton, la lumière se propage à vitesse infinie. Ils peuvent ensuite vérifier que, quoi qu'ils fassent, la simultanéité de leurs montres demeure, et se référer sans cesse au temps commun universel, qui se confond avec leur temps individuel. Il n'y a qu'un temps, qui est le même pour tous.

Ce temps newtonien a beau être absolu et universel, il manque de consistance et de réalité. Étant éternel et imperturbable, il coule identiquement à lui-même, indépendamment de tout ce qui se produit au sein de l'univers. Soumis à un tel temps, l'univers ne peut avoir d'histoire. Newton a en quelque sorte mis le temps « hors du temps ». À ce propos, on peut légitimement se demander si une telle conception de l'univers, vu comme fixe et éternel, n'a pas constitué un argument inconscient contre les théories évolutionnistes de toute sorte (darwinienne, cosmologiste), qu'il faudrait ajouter à ceux qu'avançaient les hommes d'Église. Comment un règne vivant évolutif pouvait-il être concevable dans le monde statique et déterministe que décrivait la science officielle ?

La thermodynamique décoche la première flèche

Un arc bandé dont toute la disposition tend à décocher le trait.

BOSSUET, *Traité de la connaissance de Dieu*.

Cette absence de flèche du temps dans le schéma newtonien a été ressentie comme un authentique scandale par plusieurs savants du XIX^e siècle : Ludwig Boltzmann,

Willard Gibbs, Ernst Zermelo, Joseph Loschmidt et plus récemment Ilya Prigogine (prix Nobel de chimie en 1977) l'ont dénoncée comme étant contre nature. Car il existe bel et bien des événements qui ne peuvent se dérouler qu'en sens unique, c'est-à-dire selon un temps fléché. Bien plus, la grande majorité des événements dont nous sommes témoins sont irréversibles (au grand dam de Marcel Proust, comme chacun sait). Personne n'a jamais vu un bol de chocolat se réchauffer spontanément, personne n'a jamais vu un être vivant rajeunir (quoi que clament les marchands de crèmes de beauté), et nous savons que « l'Histoire ne repasse pas les plats ». C'est pourquoi nous avons toujours tendance à rire lorsqu'un film est projeté à l'envers (ce qui revient à remonter le cours du temps). Mais alors la question se pose : de quel bois faire flèche ? Ou, en d'autres mots, comment temporaliser la physique ?

Au début du xix^{e} siècle, voulant calculer le rendement théorique des machines à vapeur alors en plein développement technique, Sadi Carnot se rendit compte que la transformation de la chaleur en énergie mécanique était limitée par le sens irréversible dans lequel s'effectuent les transferts de chaleur (du chaud vers le froid uniquement), comme si la chaleur portait en elle une qualité spéciale en rapport avec l'irréversibilité. Ses *Réflexions sur la puissance motrice du feu*, parues en 1824, contiennent les prémices de ce qui deviendra le deuxième principe de la thermodynamique. Celui-ci fut énoncé sous sa forme définitive par le physicien allemand Rudolf Clausius en 1865. Cette loi macroscopique postule d'abord l'existence, pour tout système physique, d'une grandeur appelée entropie*, fixée par l'état physique du système, et qui représente *grosso modo* le degré de désordre ou de hasard présent dans le système. Même si cette conception continue d'être ardemment débattue, il reste qu'un litre d'eau froide a bel et bien une certaine entropie, qu'un litre d'eau chaude a une entropie différente (en l'occurrence plus élevée), et

qu'elles sont toutes deux calculables à partir des conditions expérimentales. Le deuxième principe indique ensuite et surtout que la quantité d'entropie contenue dans un système isolé ne peut que croître lors d'un quelconque événement physique, c'est-à-dire que « tout fout le camp », comme le dit plus succinctement Woody Allen dans son film *Maris et Femmes*.

Prenons un exemple : l'entropie totale d'un morceau de sucre et d'une tasse de café non sucré étant inférieure à l'entropie d'une tasse de café sucré, le deuxième principe oblige le sucre à se dissoudre dans la tasse. Ainsi, puisqu'il ne peut y avoir augmentation de l'entropie qu'*au cours du temps*, ce dernier se retrouve fléché : le sucre en train de fondre au fond de la tasse de café ne reprendra jamais sa forme parallélépipédique et sa sèche blancheur initiales. Sa déstructuration apparente manifeste le sens privilégié dans lequel le temps s'écoule, l'avenir et le futur étant par elle bien différenciés. En réalité, comme nous le verrons, la croissance de l'entropie d'un système isolé exprime simplement la tendance moyenne, manifestée par ce système, à évoluer vers des états de plus en plus probables à l'échelle des molécules, ou, ce qui revient au même, vers des états de plus en plus désordonnés. Comme le démontre l'expérience courante, le désordre est en effet plus probable que l'ordre. Si, dans une partie de bridge, le jeu de cartes qu'un adversaire vient de battre nous parvenait dans l'ordre parfait : as, roi, dame... jusqu'au deux, et cela pour chacune des quatre couleurs l'une après l'autre, cela paraîtrait tellement improbable que, ne serait l'estime que nous portons à cet adversaire, nous serions prêts à le prendre pour un tricheur, avec la raison pour nous ! Ainsi, ce que l'on appelle la flèche thermodynamique du temps n'est autre que la flèche qui va de l'*improbable* vers le *probable*, de l'*ordre* vers le *désordre*. Le deuxième principe semble donc bien s'accorder avec notre sensation d'une direction bien établie du temps. Du moins à première vue...

Ludwig Boltzmann invente le sens unique

Il fait un temps de temps.

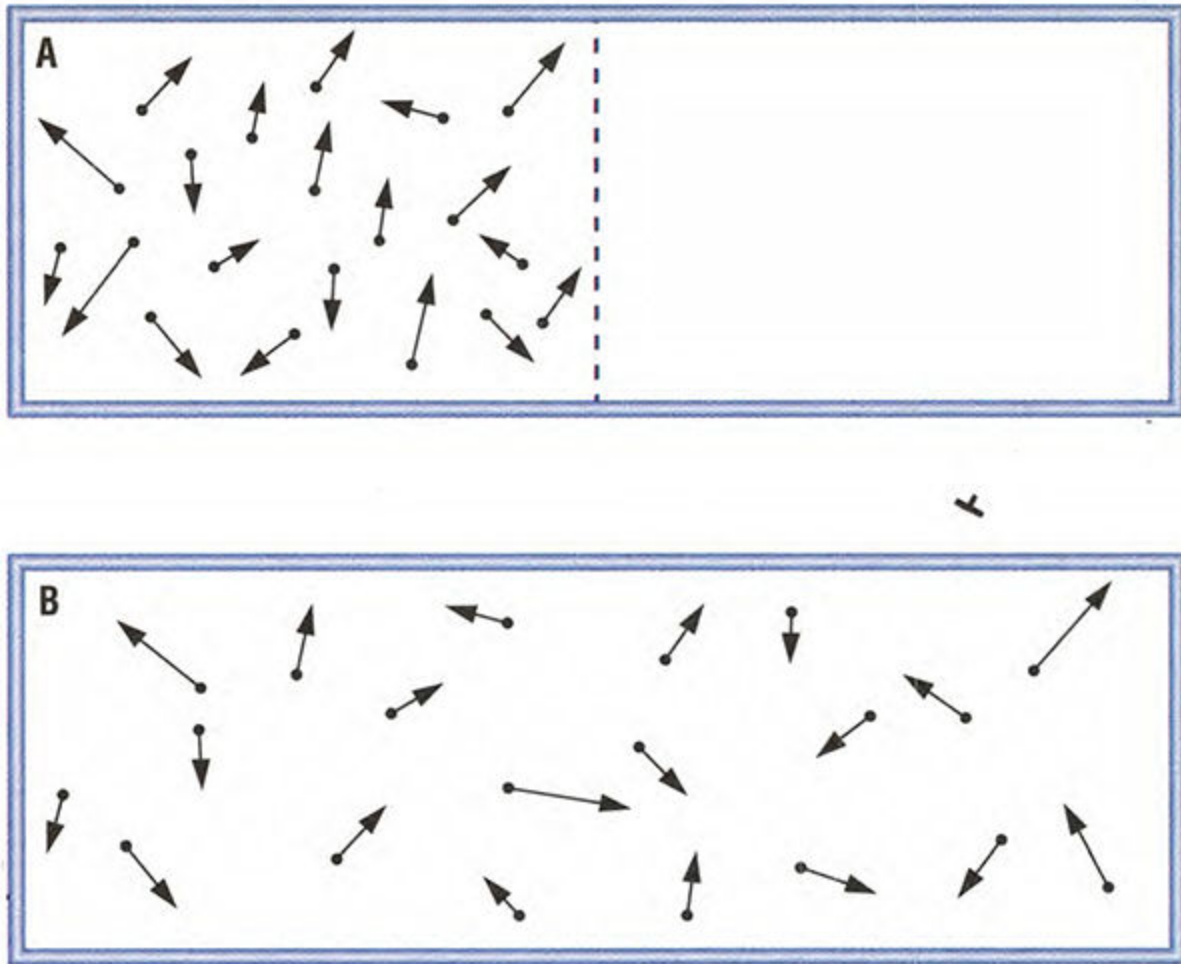
André BRETON, *Le Revolver à cheveux blancs*.

Car, comme toujours en physique, il faut regarder les choses de plus près. Parmi les équations de la physique, il y a celles qui sont fondamentales, au sens où elles rendent compte des comportements de base de la matière et, *en principe*, expliquent tout. On les qualifie de *microscopiques*, car elles concernent essentiellement les « briques élémentaires », atomes ou autres molécules, à partir desquelles la matière sous toutes ses formes est censée se construire. Le point important ici est que toutes les équations microscopiques de la physique sont réversibles : lorsqu'on y fait s'écouler la variable temps dans un certain sens, par exemple vers le futur, les équations décrivent un certain mouvement des particules ; si l'on fait s'écouler la variable temps dans l'autre sens, le mouvement calculé est le même que précédemment, mais décrit en sens inverse. Aucun de ces deux mouvements ne peut être dit plus physique ou moins physique que l'autre.

Représentons-nous les molécules comme de minuscules boules de billard. Il est clair alors que l'« inverse » temporel d'une collision entre deux molécules est *aussi* une collision entre deux molécules (même si elle est différente de la première collision), de la même façon que l'inverse temporel d'un choc entre deux boules de billard est encore un choc de deux boules de billard. Il n'y a donc aucun moyen de déterminer lequel des deux scénarios correspond au véritable écoulement du temps. En d'autres termes, si l'on filme un événement microscopique et qu'on passe le film à l'envers, ce qui revient à inverser la chronologie de l'événement, aucun spectateur ne pourra se rendre compte qu'il y a eu manipulation. C'est pour cela qu'on dit que les équations microscopiques sont réversibles. En somme, elles

décrivent des particules qui, tel Tintin, ne vieillissent pas. Mais à côté de ces équations microscopiques, il y en a d'autres, moins fondamentales, qui résument un comportement plus global de la matière. Ces équations sont dites *macroscopiques*, car elles décrivent des phénomènes qui se produisent à une échelle proche de la nôtre. Elles sont irréversibles. Par exemple, l'équation de la chaleur établie par Joseph Fourier en 1811 et décrivant la propagation de la chaleur dans les milieux qui ne présentent pas de discontinuités indique que celle-ci ne peut circuler qu'en sens unique, du chaud vers le froid et non l'inverse. Cela est d'ailleurs fort heureux. Quelles ne seraient pas nos angoisses si, prenant un bain tiède dans le huis clos de nos salles de bains, nous devions nous attendre à ce qu'un bout de la baignoire gèle pendant que l'autre se mettrait à bouillir ? Rien de tel qu'un bon principe de physique pour nous préserver, à l'heure de l'hygiène, des gelures aussi bien que des brûlures.

Le point important ici est qu'en principe les équations macroscopiques devraient découler des équations microscopiques puisqu'un comportement global n'est jamais (*a priori*) que l'assemblage d'un grand nombre d'événements élémentaires. Pourtant, les unes sont réversibles, les autres non. Par quoi raccorder les deux bouts de la chaîne ? Comment comprendre l'existence même de l'entropie, fonction dissymétrique, par rapport au temps, de l'état macroscopique du système, alors que l'on sait que l'évolution microscopique du matériau est symétrique ? Ce problème est du même ordre que celui qui avait tant troublé les philosophes grecs : comment se fait-il, se demandaient-ils, qu'il y ait des corps visibles si les corps sont formés d'atomes qu'on ne voit pas ? Par quel miracle l'invisible pourrait-il donner du visible ?



L'expansion d'un gaz.

Un gaz initialement confiné dans un volume V_A se voit soudainement offrir un volume $V_B = 2V_A$ deux fois plus grand. L'expérience montre qu'une telle expansion spontanée aboutit toujours à un état où le gaz occupe uniformément tout le volume V_B . Cette évolution marque le sens du temps puisque le passage de la configuration (B) à la configuration (A) ne s'observe jamais.

Voulant approfondir la question de l'irréversibilité, le physicien autrichien Ludwig Boltzmann (1844-1906) tenta de trouver un lien entre la mécanique newtonienne et le deuxième principe de la thermodynamique. À partir des équations microscopiques réversibles, se dit-il, peut-on obtenir, par agrégation, une équation macroscopique irréversible ? Comme il est impossible d'intégrer rigoureusement les comportements d'un très grand nombre

de particules, Boltzmann eut recours aux lois de la statistique : il dut abandonner le calcul explicite des trajectoires pour celui des probabilités. Cela lui permit d'étudier l'évolution de la distribution des vitesses des molécules d'un gaz dilué (comme l'air de l'atmosphère par exemple). Il constata, en 1872, qu'on pouvait construire une grandeur mathématique appelée H , fonction des positions et des vitesses des molécules du gaz, ayant une propriété remarquable : sous l'influence des collisions entre les molécules, elle ne peut que diminuer au cours de l'évolution vers l'équilibre, ou rester constante si le gaz est déjà à l'équilibre (auquel cas tout se passe comme si le temps ne s'écoulait plus).

Elle est donc, au signe près, l'analogue microscopique de l'entropie. Ainsi l'agrégation statistique des équations réversibles de la dynamique des particules conduit-elle à une équation macroscopique irréversible. Par la suite, Boltzmann tenta de généraliser ce résultat à des systèmes quelconques. Cela le conduisit à interpréter l'irréversibilité comme résultant d'une évolution depuis un macroétat peu probable vers un macroétat plus probable, cette plus ou moins grande probabilité reflétant le nombre plus ou moins élevé de microétats compatibles avec le macroétat. La définition de l'entropie proposée par Boltzmann est alors, à un facteur près, le logarithme du nombre de microétats possibles. Le système évoluant d'un macroétat peu probable vers un autre qui l'est davantage, l'entropie augmente en conséquence. Et la flèche tant espérée semble surgir – presque miraculeusement – au bout des calculs.

Le temps ne serait-il qu'illusion ?

Il faut avoir de grosses illusions bien grasses : on a moins de peine à les nourrir.

Jules RENARD, *Journal*.

Le problème de l'asymétrie temporelle est-il définitivement réglé pour autant ? Certes non. Car le calcul précédemment cité interprète l'irréversibilité comme n'étant qu'une réalité statistique propre aux systèmes macroscopiques, c'est-à-dire contenant un très grand nombre de degrés de liberté. Mais, dans cette affaire, la réalité « réelle », ultime, autrement dit la réalité microscopique, reste, elle, réversible. L'irréversibilité ne serait donc qu'une illusion statistique, une propriété émergente caractéristique des seuls systèmes complexes. Il n'y aurait pas, à la base des choses, une authentique flèche du temps, seulement l'apparence d'une flèche à plus grande échelle. L'irréversibilité observée serait de fait et non de principe. Bâtie sur des lois qui la nient explicitement, elle serait en réalité dense de réversibilité et saturée de symétrie temporelle.

De ce fait, le moyen que nous avons de distinguer le véritable écoulement du temps de son inverse, à savoir l'accroissement d'entropie, perd de sa vigueur. De là à dire que le temps lui-même n'est qu'illusion, il n'y a qu'un pas que d'aucuns ont franchi, et non des moindres. Einstein lui-même n'a-t-il pas écrit dans sa correspondance privée (lettre écrite le 21 mars 1955 après la mort de son ami Michele Besso à la famille de ce dernier) que « pour nous autres, physiciens convaincus, la distinction entre passé, présent et futur n'est qu'une illusion, même si elle est tenace » ? Son point de vue sur la question n'a pas toujours été aussi radical (peut-être voulait-il seulement consoler les proches du défunt ?), mais il reste qu'Einstein espérait bien éliminer la notion d'irréversibilité en ramenant la physique à une pure géométrie, c'est-à-dire à une forme « sans histoire ».

D'autres physiciens, en revanche, refusent obstinément d'appeler illusion ce temps qu'ils considèrent comme l'expérience primordiale de toute vie humaine. Ils affirment qu'un *vrai* temps s'écoule réellement, un temps que la physique n'a su ni voir ni intégrer, et ils jugent impossible

de soutenir que l'irréversibilité procède de notre subjectivité humaine ou de notre ignorance des « détails fins ». Quelque chose d'essentiel, pensent-ils, a dû échapper à la physique. Ilya Prigogine, qui défend ce point de vue avec autorité, confesse volontiers l'influence qu'eut sur lui le fulgurant aphorisme d'Henri Bergson : « Le temps est invention, ou il n'est rien du tout » (le mot invention est à prendre ici au sens de nouveauté créatrice, non au sens de chimère). Il l'a décidé à partir à la recherche du temps perdu de la physique. « Soit l'irréversibilité existe à toutes les échelles, proclame-t-il, soit elle n'existe pas. » Prenons l'exemple des molécules formant le contenu d'un verre d'eau. Est-ce que le verre d'eau vieillit ? Oui, répond Prigogine. Les molécules présentes dans le verre se cognent, ce qui installe des corrélations entre elles, de même qu'il reste un souvenir de la rencontre de deux personnes. Ces corrélations ont pour effet d'orienter le sens de l'histoire des collisions en en marquant précisément la chronologie. Selon Prigogine, cette flèche de corrélations doit correspondre à une véritable flèche du temps.

Par ailleurs, Prigogine tire les leçons de la découverte contemporaine des systèmes dits « chaotiques* ». Ces systèmes sont définis par leur « extrême sensibilité aux conditions initiales ». Cela signifie que deux tels systèmes, régis par la même équation d'évolution, avec des états initiaux aussi semblables que nous le voulons, connaîtront pourtant des évolutions radicalement différentes. Ils divergeront de manière exponentielle au fur et à mesure de leur évolution, jusqu'à devenir si distincts que leur origine commune, comme oubliée, semblera n'avoir laissé aucune trace sur eux. Autrement dit, nous aurions beau décrire l'état initial d'un système chaotique de façon aussi précise que possible, imaginer pour cela des instruments donnant des nombres dotés de milliers de décimales, il viendrait toujours un moment où cette information initiale ne nous servirait plus à rien. Ce moment marque une sorte d'horizon

temporel au-delà duquel on ne peut plus décrire l'avenir du système que par l'usage de frustrantes probabilités. Tout système chaotique semble en somme se diriger irréversiblement vers une sorte d'équilibre. C'est pourquoi, même s'il est contesté sur ce point, Prigogine tente d'utiliser la physique de ces systèmes chaotiques pour étendre la dynamique d'une façon qui pourrait donner un sens physique intrinsèque à la flèche du temps.

En résumé, au lieu de dire : « Il n'y a pas de flèche du temps, mais le niveau macroscopique crée l'illusion qu'il y en a une », on peut, comme Prigogine (mais sans nécessairement reprendre ses arguments), retourner la proposition et proclamer : « Il y a une flèche du temps, mais le niveau microscopique crée l'illusion qu'il n'y en a pas. » Dès lors, l'irréversibilité cesse d'être une affaire de point de vue, elle devient inhérente à la nature.

Le deuxième principe de la thermodynamique devient dans la foulée le premier principe de la physique tout entière ; le concept de devenir (la croissance de l'entropie) dépasse celui de l'être (les particules et autres objets physiques), l'idée d'évolution prend le pas sur celle d'existence ; Héraclite, le zélateur de la mouvance, fait oublier Parménide, le dévot de l'immobilisme. Grâce à ces inversions, qui ressemblent à une minirévolution copernicienne, le concept d'historicité pourrait faire une entrée remarquée au sein de la physique. La notion d'âge des systèmes prendrait elle aussi un sens, du moins pour les systèmes hors d'équilibre. Mais il reste à déterminer comment la flèche du temps parviendrait à percer l'harmonieux édifice de la mécanique classique, si notoirement indifférent au message d'irréversibilité qu'elle porte.

Une autre objection à l'irréversibilité est venue du « théorème de récurrence » démontré en 1889 par le mathématicien français Henri Poincaré. Que dit-il ? Que tout système classique évoluant selon des lois déterministes

(connaissant ses conditions initiales, on peut en principe calculer toute son évolution ultérieure) finit par repasser par un état aussi proche que l'on veut de son état initial, au bout d'un temps non infini, plus ou moins long. Autrement dit, l'entropie pourrait diminuer et revenir vers sa valeur initiale. L'éternel retour, en quelque sorte. Par exemple, un gaz qui s'est dilaté reviendrait vers sa configuration comprimée si l'on attendait suffisamment longtemps. Autrement dit, si votre pneu de vélo crève, vous n'avez plus besoin de pompe. Pour le réparer et le regonfler, il vous suffit d'avoir une rustine, un peu de colle et... de la patience. De beaucoup de patience en vérité, car les temps de récurrence sont très longs, supérieurs à l'âge de l'univers, même pour des systèmes de quelques particules. La récurrence théorique qu'invoque le théorème de Poincaré n'ayant jamais le temps de se produire, elle équivaut à une irréversibilité de fait. Alors, après réflexion, une pompe, c'est bien.

Temps modernes recherchent unité, désespérément...

J'ai mal à... mon temps !

Paul VALÉRY, *L'Idée fixe*.

La physique classique que nous venons de décrire n'est pas seule en course. La physique moderne, c'est aussi la relativité restreinte, la relativité générale, la mécanique quantique, la théorie des champs, la cosmologie, bref, beaucoup de formalismes qui se complètent, voire se contredisent. Essayons de mettre un peu d'ordre dans ce foisonnement fébrile, au moins à propos de la question du temps.

La relativité restreinte ou le temps élastique

Einstein (1879-1955), en bon disciple (du moins à l'époque) d'Ernst Mach (1838-1916), ne pose pas le temps et l'espace comme des *a priori*. Pour lui, le temps est simplement ce que nous mesurons avec nos horloges ; l'espace, ce que nous mesurons avec nos règles. C'est donc d'une façon très pragmatique qu'il s'intéresse aux durées mesurées entre deux événements par des observateurs situés dans des référentiels différents. Il montre que ces mesures ne donnent pas les mêmes résultats.

C'est la grande leçon de la relativité restreinte, laquelle mit en 1905 un terme à la confusion générale qui régnait dans les esprits à propos de l'éther, ce milieu au sein duquel étaient censées se propager les ondes lumineuses. Elle obligea Einstein à introduire le concept d'espace-temps, en remplacement des concepts jusqu'alors séparés d'espace et de temps. Si l'on change de référentiel dans l'espace-temps, le temps se transforme en partie en espace, et l'espace se transforme en partie en temps. En effet, pour passer d'un système de coordonnées dans l'espace-temps à un autre en translation uniforme par rapport au premier (c'est-à-dire ni accéléré ni freiné), on utilise ce que l'on appelle une transformation de Lorentz, laquelle présente la caractéristique de « mélanger » sans réelle distinction les coordonnées spatiales et temporelles. Il n'est donc plus question de « laisser le temps au temps », Einstein en tout cas s'y oppose absolument. Temps et espace deviennent relatifs et entremêlés.

Ce résultat est en rupture avec les notions familières. Il est en effet surprenant qu'on ait pu ainsi réunir le temps et l'espace, sachant que le premier s'écoule et non le second. Conséquence philosophique du trait d'union que la relativité met entre les mots d'espace et de temps : le temps perd son idéalité newtonienne, il cesse d'être extérieur à l'espace et se met à dépendre de la dynamique. Conséquence pratique : les horloges, lorsqu'elles se déplacent en mouvement rapide dans l'espace, ralentissent le rythme de leurs battements.

Ce ralentissement des horloges, qui mesure l'*élasticité* du temps de la relativité, est couramment observé sur les particules élémentaires instables, par exemple sur les muons. Les muons sont des sortes d'électrons lourds produits « naturellement » en haute atmosphère par le rayonnement cosmique, ou artificiellement lors de collisions entre particules accélérées à haute énergie. Leur durée de vie moyenne τ (*tau*) est d'environ $2,2 \cdot 10^{-6}$ seconde.

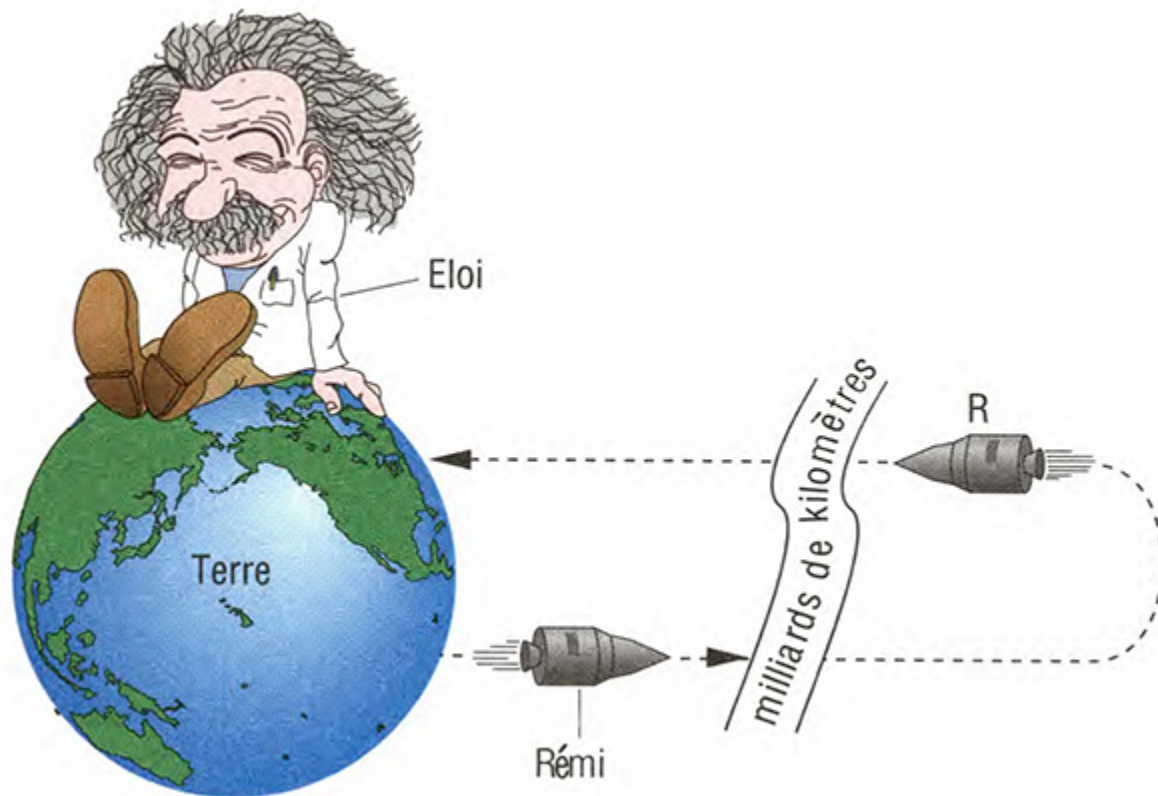
Toutefois, la théorie de la relativité implique, et l'expérience établit, que l'intervalle de temps mesuré entre la création d'un muon et sa désintégration ne coïncide avec le temps de vie « propre » τ que si ce muon naît et meurt en un même point de l'espace.

Autrement dit, cela ne vaut que s'il est immobile. Sinon, sa durée de vie effective (et donc la longueur du trajet qu'il parcourt) dépend de son énergie ou, si l'on préfère, de sa vitesse : plus il va vite et plus il « dure » longtemps, au point que, si sa vitesse est proche de celle de la lumière dans le vide, il a tout loisir de se manifester pendant un temps bien supérieur à τ (*cf.* annexe, p. 111). Tout voyage serait-il prolongation de jouvence ?

Le paradoxe des jumeaux de Langevin...

Il ouvre la fenêtre.
Un instant après,
il revient de plusieurs heures de vol

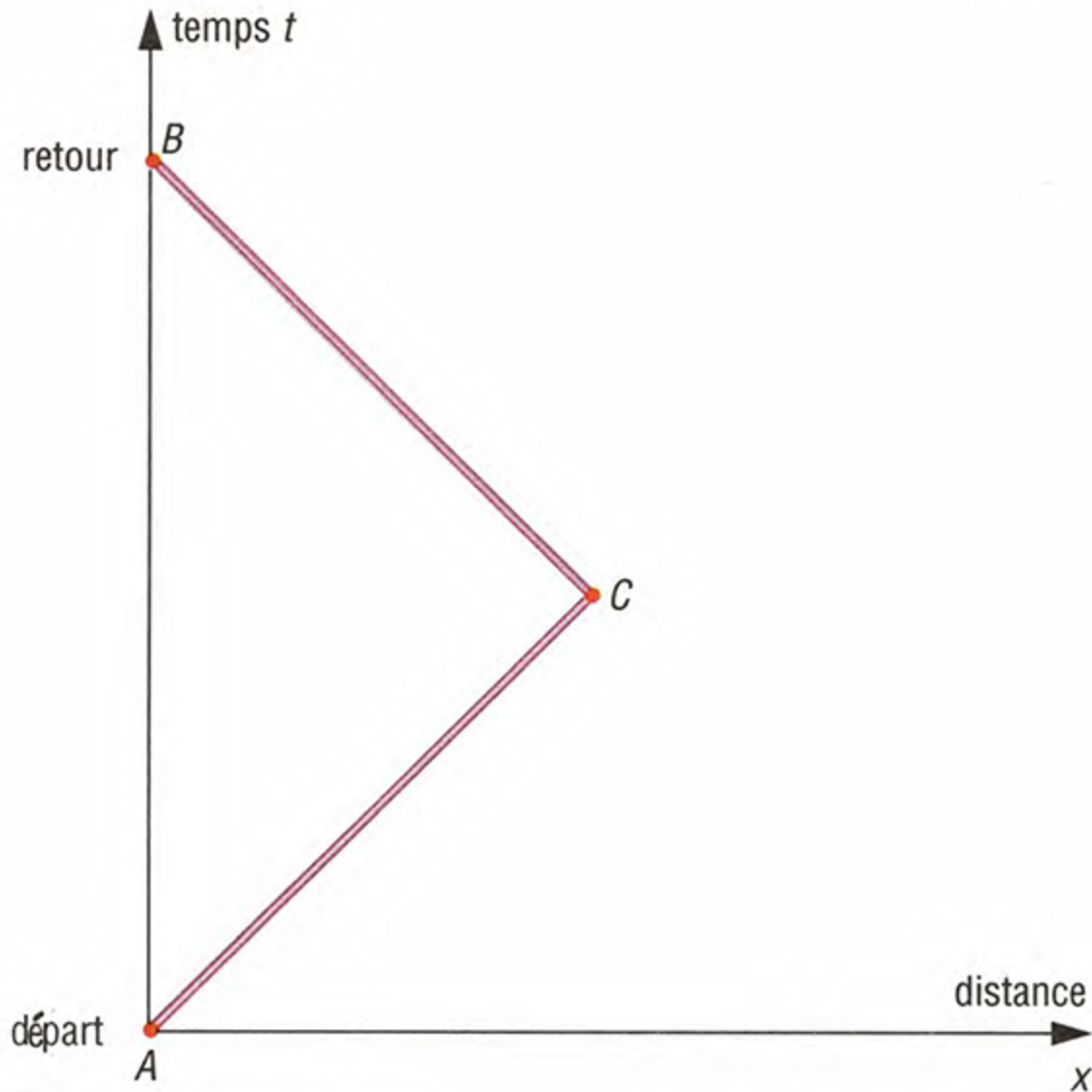
Henri MICHAUX.



Le paradoxe des jumeaux de Langevin...

L'un des deux jumeaux part vite et loin, l'autre reste sur terre. Demeureront-ils jumeaux ?

Ce phénomène de ralentissement des horloges, inhérent à la relativité, avait été illustré dès 1911, de façon provocante, par un paradoxe très célèbre, dit « des jumeaux », que l'on doit au physicien français



... et leur trajectoire dans l'espace-temps.

Ce diagramme représente les trajectoires des jumeaux dans le référentiel de la Terre. Éloi, qui se contente de vieillir en restant immobile, parcourt le segment AB dans l'espace-temps. Rémi, le jumeau voyageur, s'éloigne d'abord de la Terre en parcourant le trajet AC , fait demi-tour en C , puis revient sur Terre en suivant le trajet CB . La théorie de la relativité, résumée en annexe, explique que la distance spatio-temporelle ACB parcourue par Rémi est, contrairement aux apparences de ce schéma, plus courte que celle d'Éloi (AB). Le jumeau voyageur revient plus jeune que son frère statique, qui n'est donc plus son jumeau...

Paul Langevin. En quoi consiste-t-il ? Imaginons deux jumeaux, Rémi et Éloi, initialement sur terre, au repos, avec

leurs montres synchronisées (attention, dire qu'ils sont au repos ne signifie pas ici qu'ils font la sieste, mais qu'ils restent là où ils sont). Un beau matin, Rémi part voyager à bord d'une fusée dans l'espace où il atteint une vitesse proche de celle de la lumière (inutile ici de faire malicieusement remarquer qu'une fusée aussi rapide n'existe pas, car l'expérience que nous imaginons est une expérience « de pensée » où tout est permis) ; Éloi, plus casanier et aimant cultiver son jardin, reste chez lui. Au bout d'un certain temps, Rémi revient sur Terre et retrouve Éloi, avec lequel il peut comparer les durées qui se sont réellement écoulées pour l'un et pour l'autre. Curieusement, ces durées ne sont pas les mêmes. Rémi et Éloi ne sont donc plus jumeaux, seulement frères. L'un d'eux, Éloi, le « statique », est devenu l'aîné. Deux années ont passé pour lui, par exemple, et seulement une pour Rémi. Ce résultat, pour étrange qu'il soit, est parfaitement conforme aux prédictions de la relativité, et expérimentalement établi, non pas avec des êtres humains, mais avec des horloges atomiques embarquées à bord d'avions très rapides. À défaut de former la jeunesse, les voyages rapides, très rapides, la conservent.

Une telle élasticité du temps change bien des choses. Tant que l'on a cru à un temps universel, on a pu dire que le passé n'existait plus, que l'avenir n'était pas encore, et donc que le présent seul existait. La relativité rend caduc un tel discours : des événements qui sont dans le futur pour tel observateur sont dans le passé pour tel autre et dans le présent pour un troisième.

En d'autres termes, ce qui m'est présent à un certain instant n'existe plus ou pas encore pour quelqu'un d'autre en déplacement par rapport à moi. Le mot « maintenant » devient ambigu puisque le concept de simultanéité perd son sens. Qui plus est, il existe désormais autant de chronomètres fondamentaux qu'il y a d'objets en mouvement uniforme. Et on ne peut pas synchroniser ces

horloges. Si on ajuste leurs cadrans à un certain moment, les heures indiquées ne coïncident plus quelques instants plus tard. Chaque observateur a l'impression que le temps indiqué par les horloges autres que la sienne propre est « dilaté » en raison, précisément, du ralentissement des horloges. Le temps n'a donc plus d'étalon. Que devient, dans un tel enchevêtrement, le statut propre du temps ?

La présentation la plus célèbre du principe de relativité d'Einstein consiste à dire que la description des phénomènes, et notamment la propagation de la lumière dans le vide, ne dépend pas du choix du système d'observation si celui-ci est dans un référentiel d'inertie* (c'est-à-dire un référentiel dans lequel tout corps isolé, sur lequel aucune force n'agit, suit un mouvement rectiligne et uniforme). La vitesse de la lumière, qui est finie, est la même dans tous les référentiels qui sont en translation rectiligne et uniforme par rapport à l'un quelconque de ces référentiels d'inertie.

Cela entraîne une rupture fondamentale avec la représentation newtonienne de l'espace et du temps. Lorsque, dans l'espace ordinaire, la distance entre deux points s'annule, ces deux points coïncident nécessairement (une sphère de rayon nul se confond avec son centre).

Mais, dans l'espace-temps d'Einstein, lorsque l'intervalle s entre deux événements s'annule, la distance d et la durée t qui les séparent peuvent être arbitrairement grandes, pourvu que leur quotient d/t soit égal à la vitesse de la lumière. Cela vient de ce que l'intervalle s est défini par la relation suivante : $s^2 = d^2 - c^2 \cdot t^2$ (sa valeur ne dépend pas du référentiel dans lequel on le calcule, ainsi qu'il est montré dans l'annexe). De la sorte, les objets les plus lointains perçus par nos télescopes sont aussi les plus vieux (quelque dix milliards d'années), même s'ils nous apparaissent dans leur plus fraîche jeunesse. Nous les voyons en effet comme ils étaient à l'époque où ils ont émis la lumière qui nous révèle aujourd'hui leur existence. Mais,

malgré leur gigantesque éloignement, ces objets sont, au sens de la relativité, à intervalle nul de nous !

L'image de l'univers que les télescopes nous montrent n'est pas notre contemporaine. Tous les objets qu'ils nous donnent à voir ne sont plus dans l'état où nous les voyons. Dès lors, le physicien relativiste se doit d'avoir constamment à l'esprit l'espace-temps dans sa totalité, c'est-à-dire tous les événements – de tous les lieux et de tous les temps – des origines à la fin du monde. Cela induit progressivement chez lui la propension à se faire une représentation statique de l'espace-temps, où celui-ci est développé dans toute son étendue spatiale et temporelle. Il raisonne et légifère comme si l'espace-temps était totalement développé, immobilisé, gelé. Le temps perd alors à ses yeux sa spécificité de grandeur en devenir puisque la relativité met sur un pied d'égalité la symétrie gauche-droite propre à l'espace et la symétrie passé-futur. C'est pourquoi on peut dire qu'elle « spatialise » le temps, dépouillant ce dernier de son caractère de grandeur irréversible. Avec elle, le physicien, ne serait sa modestie naturelle, pourrait devenir une sorte de Dieu dissertant comme s'il œuvrait dans l'éternité.

Temps et gravitation

Tant qu'à faire qu'à voyager dans le temps, il vaut mieux que le temps soit beau !

Raymond DEVOS, *La Quatrième Dimension*.

Venons-en maintenant à la gravitation et à ce qui semble être aujourd'hui sa bonne théorie, la relativité générale d'Einstein. Si l'on en croit les principes de celle-ci, la gravitation n'est pas une force s'exerçant entre les différents contenus matériels de l'univers. Elle est plutôt une propriété *géométrique* de l'univers lui-même. Cette insertion de la gravitation dans l'espace-temps lui-même oblige ce dernier

à se déformer, à se cabosser, autrement dit à devenir *courbe*. C'est au sein de cet espace-temps courbe que l'espace, le temps et *aussi* la matière ont des intrigues mêlées, d'ailleurs fort compliquées. Les équations d'Einstein prévoient en effet que la densité de masse et d'énergie conditionne la structure même de l'espace-temps et que c'est cette structure (qu'on appelle la « métrique » de l'espace-temps) qui, en retour, détermine la dynamique et la trajectoire des objets contenus dans l'univers.

Dans un tel contexte, non seulement la vitesse des observateurs, mais aussi la masse (l'intensité du potentiel gravitationnel) influent directement sur la vitesse d'écoulement du temps. C'est ainsi qu'on parle de décalages gravitationnels, de délais temporels, autant d'effets nouveaux vérifiés par l'expérience. Être lourd devient une façon comme une autre de « prendre son temps ».

On pourrait s'attendre à voir la cosmologie confirmer la vision d'un espace-temps statique telle que la prône la relativité restreinte. Il n'en est rien. Les physiciens sont aujourd'hui quasi unanimes à s'accorder sur des modèles d'univers particuliers, dits « de big-bang », au sein desquels règne un temps « cosmologique », lié à l'expansion de l'univers*. Sans pour autant s'identifier au temps absolu de Newton, ce temps cosmologique partage avec lui la propriété d'être *universel* : des observateurs qui ne sont soumis à aucune accélération et ne subissent aucun effet gravitationnel mutuel peuvent en effet synchroniser leurs montres, et celles-ci resteront en phase tout au long de l'évolution cosmique. De plus, ce temps cosmologique s'écoule toujours dans le même sens ; il est fléché, et c'est ce qui permet de l'utiliser pour retracer l'histoire de l'univers. Mais il y a une différence : c'est que, contrairement à ce que croyait Newton, ce temps cosmologique ne peut pas être posé comme un *a priori* puisque ces propriétés sont déterminées par le contenu même de l'univers. Dépendant du modèle cosmologique

choisi, il ne peut être érigé simplement en absolu. En particulier, il est difficile de le considérer comme le cadre dans lequel nos perceptions viendraient se loger. On peut même se demander si ce temps, comme tout temps, existe réellement par lui-même, ou s'il faut au contraire penser, comme le physicien autrichien Ernst Mach (à la suite de David Hume, George Berkeley, Gottfried Wilhelm Leibniz), qu'il n'est qu'un moyen commode pour exprimer certaines relations entre les phénomènes.

L'origine du temps cosmologique, à l'instar de celle de l'univers lui-même, se perd dans les brumes aurorales de l'univers primordial. En effet, admettre le modèle du big-bang, pour un physicien, c'est reconnaître l'impossibilité d'extrapoler indéfiniment vers le passé à l'aide des lois de la physique. Une telle extrapolation conduirait infailliblement à une impasse, c'est-à-dire à un état de l'univers dans lequel les lois de la physique telles que nous les connaissons entreraient en conflit les unes avec les autres, à cause de l'incompatibilité des principes de la physique quantique avec ceux de la relativité générale. Cette situation rendant tout calcul vain et toute conjecture chimérique, nous ne savons rien de l'origine de l'univers, rien non plus de l'origine du temps, que le terme « origine » soit pris au sens chronologique ou au sens explicatif.

Examinons enfin ce qu'il advient ici du principe de causalité évoqué plus haut. Ce principe ordonne les événements selon un enchaînement irréversible. « La cause précède toujours l'effet », indique-t-il. En nous empêchant de rétroagir dans le passé pour modifier une séquence d'événements qui ont déjà eu lieu, la causalité nous protège des affres qu'illustre le célèbre « paradoxe du grand-père ».

Un jeune homme, Paul, remonte le temps, rencontre son grand-père encore tout jeune, Denys, au moment où celui-ci courtise Françoise, sa future femme (la future grand-mère de Paul). Paul prouve à Denys qu'il est bien son petit-fils en lui racontant des secrets de famille que Denys n'a encore

révélés à personne. Abasourdi, Denys s'en va raconter à Françoise qu'il vient de rencontrer leur petit-fils. Françoise, doutant de la santé mentale de celui qu'elle comptait épouser, décide de rompre avec lui, empêchant la naissance de l'enfant qui serait devenu le père de Paul (on trouve une trame semblable dans le film de Robert Zemeckis *Retour vers le futur*)... La causalité, on le voit, évite bien des drames familiaux. Est-elle respectée en relativité restreinte ? Oui, toujours, car si, pour un observateur, un événement A est antérieur à un événement B et tel qu'un signal lumineux a le temps de partir de A pour atteindre B, alors il en est de même pour n'importe quel autre observateur. En réalité, ce lien de causalité est implicite en relativité restreinte puisque sa violation (un voyage dans le passé) équivaldrait à se déplacer plus vite que la vitesse de la lumière, ce qui est interdit par les principes mêmes de la théorie.

En revanche, en relativité générale, certaines distorsions imprimées à l'espace-temps, notamment par des trous noirs* en rotation, pourraient autoriser l'exploration du passé sans qu'il y ait dépassement de la vitesse de la lumière. D'une façon générale, la causalité est violée dès qu'il existe une boucle temporelle, c'est-à-dire une ligne d'univers (d'espace-temps) refermée sur elle-même. Personne ne sait si de tels dangers pour la tranquillité des familles existent de par chez nous.

L'inconfortable dossier quantique

Tout l'infini frémit d'un atome qu'on touche.

Victor HUGO.

Venons-en maintenant au cas – très délicat lui aussi – de la mécanique quantique, qui fut élaborée dans les premières décennies de ce siècle. La physique classique ne pouvant rendre compte correctement du comportement des atomes,

et en particulier des interactions entre matière et lumière, elle fut en l'occurrence remplacée par un formalisme révolutionnaire, le formalisme quantique, dont la fécondité concerne aujourd'hui toutes les branches de la physique. Pour décrire l'état d'un système quantique, par exemple une particule, on utilise un objet mathématique que l'on appelle la fonction d'onde* du système. En général, cette dernière est une somme de plusieurs termes distincts, chacun des termes correspondant à une valeur possible d'une propriété physique du système (sa position, son énergie...). Cette possibilité de décrire tout système physique par une somme d'états est la conséquence directe de ce que l'on appelle le principe de superposition*, selon lequel deux états quelconques d'un système physique peuvent toujours être superposés (en fait ajoutés) pour donner un nouvel état de ce système, à la manière dont deux ondes à la surface d'un étang se superposent pour donner une nouvelle onde. Une des originalités troublantes de la physique quantique vient de ce qu'elle postule, en marge de ce principe, que lorsque l'on fait une mesure sur le système, par exemple une mesure de son énergie, il se produit une modification brutale de la fonction d'onde : un seul terme de la somme qu'elle contient subsiste, correspondant à la valeur de l'énergie qui a été effectivement mesurée. On dit que la fonction d'onde a été « réduite » par la mesure.

D'après l'interprétation courante de la mécanique quantique, le choix du terme de la somme qui subsiste après cette réduction est parfaitement aléatoire, la fonction d'onde avant la mesure permettant seulement de calculer la probabilité que telle ou telle valeur soit sélectionnée. En physique quantique, c'est donc la mesure qui *définit* précisément la propriété mesurée. Ainsi, dans le cas qui vient de nous servir d'exemple, l'énergie du système n'était pas définie puisqu'elle pouvait prendre *a priori* plusieurs valeurs, chacune étant associée à un terme de la somme. Mais cette indétermination cesse dès qu'une mesure isole

précisément une valeur particulière de l'énergie, c'est-à-dire ne retient qu'un terme de la somme constituant la fonction d'onde d'avant la mesure.

Qu'en est-il alors de la question du temps en physique quantique ? Pour simplifier, nous ne retiendrons de son formalisme que l'équation de Schrödinger, qui est valable tant que les vitesses restent faibles par rapport à celle de la lumière. Elle permet de calculer l'évolution au cours du temps de la fonction d'onde associée à toute particule. Cette équation est parfaitement réversible, et elle est tout aussi parfaitement déterministe. Le temps qu'elle manipule est donc *a priori* le temps newtonien, qui est réversible. En fait, les choses ne sont pas si simples, car la physique quantique a, comme nous venons de le voir, une structure duale : elle utilise, *en plus* de ses équations, une théorie de la mesure très particulière, qui met son formalisme en relation avec les résultats effectifs des mesures. L'évolution d'un système obéit à l'équation de Schrödinger tant qu'aucune mesure n'est faite sur lui. Si une opération de mesure a lieu, un seul des résultats de mesure *a priori* possibles se réalise effectivement. Cette sélection se faisant de façon strictement aléatoire, on parle d'« indéterminisme quantique ».

Le processus de réduction de la fonction d'onde associé à tout acte de mesure implique incontestablement la production irréversible d'une « marque » sur le système, que l'équation de Schrödinger ne décrit pas. Mais introduit-il ou non une authentique irréversibilité temporelle ? A-t-on le droit de parler d'une flèche quantique ? Si oui, ce serait une bien étrange flèche qui apparaîtrait là, puisque ce sont les mesures faites sur les systèmes (et donc *in fine* l'observateur) qui interviendraient implicitement dans la création de l'irréversibilité.

Les dispositifs de mesure étant des systèmes macroscopiques, certains auteurs pensent que cette irréversibilité n'est pas dans son principe très différente de

l'irréversibilité selon Boltzmann. Mais, là encore, s'agit-il d'une véritable irréversibilité ? Que se passe-t-il si nous inversons mathématiquement le sens d'écoulement du temps ? L'équation de Schrödinger étant réversible, l'évolution inverse du système est conforme à l'image inversée du processus initial, du moins tant que l'on n'a pas atteint à nouveau l'instant de la mesure. Quand on l'atteint, le système a à choisir parmi plusieurs passés possibles, de même qu'il avait eu à choisir parmi plusieurs futurs possibles dans le processus initial. Celui qui est choisi n'est pas nécessairement le « vrai » passé du système. Il y a donc irréversibilité dans la mesure où l'*inverse du processus* n'est pas le *processus inverse*.

Cependant, cette irréversibilité est d'un type très particulier : on peut même considérer qu'elle correspond à une véritable réversibilité. En effet, l'évolution inverse du processus que nous avons envisagé, si elle ne correspond pas exactement au film inversé du processus normal, ressemble trait pour trait à un véritable processus quantique. La multiplicité des passés possibles renvoie à celle des futurs possibles dans le processus réel. Elle symétrise en quelque sorte les statuts du passé et du futur. N'est-ce pas là la signature même de la réversibilité ?

Il faut aussi dire un mot sur ce que l'on appelle la non-séparabilité quantique. Cette non-séparabilité, naturellement sous-jacente au formalisme quantique, a été expérimentalement établie en 1983 par l'équipe du physicien français Alain Aspect. De quoi s'agit-il ? Il saute aux yeux que le concept de localité*, qui permet de situer un objet dans l'espace, est mis à mal par celui de fonction d'onde : la fonction d'onde d'une particule est en général étalée dans l'espace, et n'indique que la probabilité de détecter la particule en tel ou tel endroit. Il restait à savoir si la localité pouvait être rétablie au sein d'une théorie plus fine que la mécanique quantique traditionnelle. Cette question fut au centre d'un article célèbre publié par

Einstein en 1935. Einstein estimait, en accord avec sa théorie de la relativité restreinte, qu'il y a des cas où l'on est certain que de deux événements aucun n'influence l'autre : c'est lorsqu'ils sont si éloignés dans l'espace et si rapprochés dans le temps que la lumière n'a pas le temps de les relier. Or, ce point de vue a été récemment démenti par l'expérience de 1983.

On peut désormais affirmer qu'il existe bel et bien des systèmes non séparables de particules, tels que prévus par la mécanique quantique. C'est ainsi que deux photons qui ont interagi dans le passé peuvent constituer un tout inséparable, même lorsqu'ils sont très éloignés l'un de l'autre. Dans ce cas, il n'est pas permis de considérer qu'ils sont individuellement constitués dans l'ensemble qu'ils forment. Ils ont un comportement global qui neutralise toute tentative d'explication en termes de photons indépendants possédant chacun en propre et à l'avance (c'est-à-dire avant toute mesure) des propriétés physiques bien définies. Les deux particules restant comme unies par un lien qui ne dépend ni de l'espace ni du temps, on ne peut les séparer par la pensée. Toute action exercée sur l'une se répercute instantanément sur l'autre, quelle que soit la distance qui les sépare. Du coup, la possibilité, pour le physicien, de séparer deux événements pour leur appliquer le principe de causalité n'existe pas en toutes circonstances. Est-ce à dire que nos idées les mieux assises concernant l'espace et le temps sont à remettre en cause ? Est-ce notre conception de l'espace qu'il faut revoir ? Ou plutôt celle du temps ? Ou les deux ?

Par ailleurs, il est notoire que la relativité générale et la mécanique quantique, quoique du même âge et souvent fiancées, rechignent à s'accoupler. Il existe toutefois un argument simple qui fournit les échelles de temps et de distance en deçà desquelles devrait impérativement intervenir le mariage de ces deux théories. Cet argument utilise l'analyse dimensionnelle. Il prend acte du fait qu'il

existe en physique des constantes jugées fondamentales qui ont, comme leur nom l'indique, la sympathique propriété de demeurer identiques au cours du temps et en tous les points de l'espace. Il s'agit, entre autres, de la constante de la gravitation G , de la vitesse de la lumière c , et de la minuscule constante de Planck h , d'essence quantique.

G , la première de ces constantes, fut introduite par Newton pour traduire le fait que la force de gravitation entre deux objets est proportionnelle au produit de leur masse et inversement proportionnelle au carré de leur distance. Elle s'exprime en une unité étrange. Elle vaut en effet $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$.

La vitesse de la lumière dans le vide c , invariante par changement de référentiel, est la borne supérieure de toutes les vitesses. La relativité explique en effet que nul objet massif ne court plus vite qu'un photon. La vitesse c est si grande qu'elle donne le vertige. Il faut dire qu'elle ne vaut pas moins de $299\,792\,458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

La constante h fut introduite par Max Planck en 1900. Sa présence dans le formalisme quantique traduit le fait qu'il ne peut y avoir d'interaction entre deux systèmes que s'ils s'échangent quelque chose, et que ce quelque chose ne peut pas être aussi petit que l'on veut. Il doit être au moins égal à un *quantum* d'interaction, lié à la constante h . Cette dernière a beau être minuscule (sa valeur est $6,622 \cdot 10^{-34}$ joule-seconde), son importance est cruciale puisque c'est à cause d'elle que le monde atomique est quantique et non classique.

Chacune de ces trois constantes ayant une unité de mesure bien définie, il est possible de les combiner (par multiplication et division) de façon à obtenir une grandeur s'exprimant en unité de temps (c'est d'ailleurs un excellent exercice que nous recommandons à notre lecteur...). Sauf erreur de calcul, le temps ainsi obtenu, $(Gh / c^5)^{1/2}$, vaut environ 10^{-43} seconde. En multipliant ce temps par la vitesse de la lumière, on obtient une quantité ayant la

dimension d'une longueur, $(Gh / c^3)^{1/2}$, qui a une valeur numérique de l'ordre de 10^{-35} mètre. Tout cela fait bien bref et bien court, mais il ne faut pas s'en plaindre : ce temps et cette longueur dits « de Planck » sont des échelles en deçà desquelles l'espace-temps ne peut plus être considéré comme « lisse ».

Pour des distances ou des temps plus courts (comme dans l'univers primordial), on s'attend en effet à ce que l'espace et le temps se présentent sous un jour très différent, à peine imaginable. Ils pourraient être discontinus ou fluctuants, ce qui changerait fondamentalement les lois physiques elles-mêmes. Mais le temps aussi bien que la longueur de Planck étant inaccessibles à l'expérience, ces hypothèses demeurent hautement spéculatives. Car, à la différence des pizzas, les big-bangs qui permettraient de les vérifier ne se font pas à la commande...

Quand un miroir se met à réfléchir...

Ô miroir !

Eau froide par l'ennui de ton cadre gelée...

MALLARMÉ, *Hérodiade*.

En matière de temps, la physique des particules a elle aussi son mot à dire. Les théoriciens de cette discipline ont très habilement su utiliser toute la richesse du concept de symétrie. Chacun comprend bien par exemple que l'image dans un miroir d'une expérience de physique n'est pas identique à l'expérience elle-même : gauche et droite sont inversées. Mais les physiciens ont longtemps cru que cette image correspondait *aussi* à une expérience de physique, réalisable comme l'autre en laboratoire. C'est cette invariance de la physique par réflexion dans un miroir qu'ils appellent la « conservation de la parité* ». En effet, l'opération qui, dans le formalisme, correspond à la réflexion

dans un miroir s'appelle la parité. On la note P. Elle consiste à inverser les coordonnées spatiales des particules. On peut démontrer que le fait de dire d'une théorie qu'elle conserve la parité revient à dire qu'aucune expérience qui relève de cette théorie ne permettrait de donner un sens absolu aux notions de droite et de gauche. La définition de la droite et de la gauche ne peut donc qu'être arbitraire ou culturelle.

Les choses se compliquent un petit peu si l'on se souvient qu'il existe d'autres opérations de symétrie que la parité. Par exemple, dans une réaction faisant intervenir des particules et des antiparticules, on peut par la pensée remplacer chaque particule par son antiparticule et *vice versa*. Cette permutation de la matière avec l'antimatière s'appelle la conjugaison de charge*. On la note C. Une autre opération, notée T, consiste à inverser le sens du temps. Appliquée à un processus quelconque, elle revient à dérouler le processus dans le sens opposé à celui où il a effectivement eu lieu. Sous peine de perdre leurs fondements les mieux ancrés, toutes les théories de la physique prédisent l'invariance des lois de la dynamique par l'opération globale CPT. Cela signifie que, si l'on passe à l'envers le film de l'image dans un miroir de n'importe quel phénomène dans lequel on a échangé particules et antiparticules, on observe un phénomène aussi probable que celui dont on est parti, même s'il est différent.

Cette invariance, qui garantit que la relativité restreinte, la mécanique quantique et la causalité sont prises en compte dans les processus élémentaires, est notamment vérifiée par le fait que la masse et la durée de vie moyenne des particules instables sont rigoureusement égales à celles de leurs antiparticules. Si l'on appliquait globalement l'opération CPT à notre monde, on obtiendrait un monde qui aurait une autre allure. Par exemple, chaque proton y serait remplacé par un antiproton d'hélicité opposée. Mais les équations régissant ce nouveau monde resteraient identiques à celles qui valent dans le nôtre.

À leur grande surprise, les physiciens découvrirent en 1957 que la loi de conservation de la parité n'est pas respectée par une des quatre interactions fondamentales de la nature : l'interaction nucléaire faible, qui est responsable de certains phénomènes de radioactivité. L'image dans un miroir de tels processus ne correspond pas à un phénomène qu'on puisse reproduire, comme si la nature refusait de toujours respecter la symétrie entre la droite et la gauche. Le physicien Wolfgang Pauli (1900-1958) résuma la chose en disant que « Dieu est faiblement gaucher », ce qui fait bien plaisir à l'auteur de ces lignes, qui, lui, l'est fortement.

Après avoir constaté que l'invariance par P n'était pas respectée par l'interaction faible, on démontra que cette dernière violait aussi l'invariance par C, d'une façon telle que la symétrie globale PC était, elle, préservée. Arrivé à ce point du raisonnement, il ne fallait pas être grand clerc pour conclure que l'invariance par PC, combinée à l'invariance PCT, impliquait l'invariance par T. Ce résultat rassurant ne tint que quelques années. En 1964, une expérience réalisée à Princeton aux États-Unis par J. H. Christenson, J. W. Cronin, V. L. Fitch et R. Turlay révéla (à la surprise générale !) que l'invariance par PC est brisée, même si ce n'est que très légèrement, lors de la désintégration de particules étranges qu'on appelle les kaons neutres. Cela se traduit par le fait qu'un très faible pourcentage de ces kaons neutres se désintègre en deux pions au lieu de trois. Mais alors, PCT étant toujours conservée, si PC ne l'est pas en l'occurrence, c'est que T ne l'est pas non plus ! Trente ans après qu'on l'a découverte, l'origine profonde de cette légère brisure de la symétrie temporelle passé-futur reste mystérieuse. La question reste posée de savoir si l'on doit ou non lui associer une flèche et, si oui, quelle portée il faudrait lui donner. Cette question n'est pas seulement académique. Comme le suggérait Andreï Sakharov dès 1967, la brisure de la symétrie PC pourrait expliquer que la matière l'ait emporté sur l'antimatière lors de la formation de l'univers primordial.

Il n'est donc pas exclu que nous lui devions la possibilité même de notre propre présence en cet univers : sans doute n'aurions-nous pu apparaître en ce monde s'il n'avait été légèrement bancal. Mais quel comble ce serait de devoir une fière chandelle à l'obscur dissymétrie du *fiat lux* initial !

À quand la concordance des temps ?

Deux droites parallèles s'aimaient.
Hélas !

Alphonse ALLAIS.

Aujourd'hui, la plupart des physiciens qui cherchent à étudier de façon synthétique la flèche du temps pensent qu'elle est liée à la gravitation. Il se pourrait bien, avancement-ils, qu'il y ait un lien unificateur entre violation de la symétrie PC, gravitation et flèche du temps. C'est une voie de recherche qui semble prometteuse, du moins aux yeux et au dire de ceux qui sont capables de la juger. Mais pour le moment, il est clair que – justement – les choses ne sont pas claires. La physique, comme les moteurs, a plusieurs temps. Chacun de ses systèmes conceptuels donne au temps un statut original et particulier. Dès lors, le visage du temps même reste celui d'un sphinx, son essence demeure fantomatique, indécise et plutôt disparate. Il n'y a pas d'universalité du concept de temps, ni d'unité théorique autour de lui. Nous avons fait l'inventaire de son carquois et nous n'avons vu apparaître que des bribes de flèche (thermodynamique, cosmologique, quantique), sans pouvoir mettre le doigt sur une flèche mère de toutes ces fléchettes, qui vaudrait pour la physique tout entière. Certes, leur coexistence est pacifique, mais comment les rassembler ? Y aurait-il une unité théorique du temps si les théoriciens parvenaient à unifier les quatre interactions fondamentales que la physique reconnaît aujourd'hui ? Ou bien est-ce au

contraire cette vision unitaire du temps qui leur manque pour progresser ? Après tout, les divers temps dont nous avons parlé possèdent peut-être un noyau dur, mais bien caché, de propriétés communes. La mise en évidence d'une « concordance des temps » de la physique, outre le fait qu'elle mettrait de l'ordre là où il n'y en a guère, apporterait aussi un nouvel éclairage sur quelques-uns des problèmes fondamentaux qui sont à l'ordre du jour, tels ceux que pose l'interprétation de la physique quantique. Les théories fondamentales de demain pourraient donc naître des interrogations sur la nature du temps.



Sommes-nous tous dans le même temps ?

Y a-t-il un ou plusieurs temps ? Celui que nous mesurons à l'intérieur de nous-mêmes dépend de l'intensité et de la signification des événements que nous sommes en train (c'est le cas de le dire) de vivre. Par quoi ce temps-là se lie-t-il à celui que donne l'horloge ?

Ph. © Jean-Pierre Vieil / Rapho.

Quant à l'irréversibilité, est-elle mirage ou réalité ? La bonne réponse à cette question se trouve sans doute à la couture de la matière et de la vie : elle mettrait vraisemblablement en évidence l'entrelacs de facteurs

externes et internes à l'homme, opposant le temps objectif et le temps subjectif. À moins que ces deux façons de penser, celle qui se fonde sur l'histoire et le temps, et celle qui se fonde sur l'éternité et l'absence de temps, soient deux composantes contradictoires mais inséparables de l'effort de l'homme pour comprendre le monde. Ni l'une ni l'autre ne permettant de tout décrire, et aucune des deux n'étant réductible à l'autre, ne sont-elles pas très exactement *complémentaires* ?

Les physiciens n'étant pas parvenus à faire jaillir un temps unique de leurs équations, il est difficile de préciser le statut des différentes flèches qu'ils ont taillées.

Le temps physique et le temps psychologique, gardant leurs particularités, n'apparaissent pas réconciliés.

Tout ce qui est à rapport au temps.

On ne peut donc pas parler du temps sans aussi parler du reste.

S'imposant à toutes les disciplines et n'étant l'apanage d'aucune, la question du temps invite à ignorer les chasses gardées de l'intellect.

EXERCICES DE TEMPS



Lutte pied à pied avec le chronomètre

L'homme ne se lasse pas de défier le temps. Sans cesse, il invente des instants qu'il ressent comme des moments d'éternité, et dont il imagine qu'ils restent répertoriés dans on ne sait quel registre.

Ce qui dure toujours serait-il lié au furtif plutôt qu'au définitif ? à l'éclat plutôt qu'à la constance ?

Ph. © Tony Duffy / Allsport / Vandystadt.

Le temps de la connaissance

« Il y a de bien différentes opinions touchant l'essence du temps », disait déjà Blaise Pascal dans ses *Pensées*. Des propos qui résistent... au temps lui-même, lequel continue d'engendrer d'insondables paradoxes dès qu'on tente de rendre raison de lui. Ose-t-on s'aventurer dans sa profondeur, on se trouve engagé dans un labyrinthe aux multiples détours. C'est que, d'essence mystérieuse et d'apparence malicieuse, le temps ne se laisse pas facilement prendre dans les filets de l'intellect. Il amène toute réflexion, aussi prodigieuse et pénétrante soit-elle, jusqu'à une sorte de butée. C'est pourquoi il a tant fasciné – et même usé – des générations de penseurs.

Les philosophes à l'assaut du temps

Je connais un labyrinthe grec qui est une ligne unique, droite.

Sur cette ligne, tant de philosophes se sont égarés qu'un pur détective peut bien s'y perdre.

Jorge Luis BORGES, *Fictions*.

Le temps est un lieu de rendez-vous pour questions et problèmes transdisciplinaires. Le moment est venu de citer quelques-unes des difficultés que toute analyse du temps, même nonchalante, fait jaillir tôt ou tard.

D'abord, comme l'a noté saint Augustin qui fut peut-être le plus grand penseur du temps, le mot « temps » ne dit pratiquement rien de la chose qu'il est censé exprimer. Ce terme anodin, qui désigne l'objet d'un savoir et d'une expérience immédiats, se perd dans les brumes dès qu'on veut en saisir le contenu : « Si on ne me le demande pas, je crois savoir ce qu'est le temps, écrivait saint Augustin dans ses *Confessions*, mais si on me le demande, je ne le sais plus. » Ce premier mystère du temps donne le vertige. On peut bien sûr tenter de définir le temps, dire qu'il est ce qui passe quand rien ne se passe ; qu'il est ce qui fait que tout se fait ou se défait ; qu'il est l'ordre des choses qui se succèdent ; qu'il est le devenir en train de devenir ; ou, plus plaisamment, qu'il est le moyen le plus commode qu'a trouvé la nature pour que tout ne se passe pas d'un seul coup. Mais aucune de ces expressions en forme de pirouette ne rend compte de la nature et de l'intégrité du temps. La difficulté vient de ce que l'on ne peut parler de lui sans *aussi* parler de tout le reste. Le temps n'est pas un isolât de la pensée. Il ne se dénuide jamais. N'est-il pas vain alors de vouloir « donner un sens plus pur à ce mot de la tribu », comme dit Mallarmé ? Le mieux n'est-il pas, comme Pascal nous y invite, de nous en remettre au sens ordinaire et reçu de tous, « car les définitions ne sont faites que pour désigner les choses que l'on nomme, et non pas pour en montrer la nature » ? Il faut renoncer à vouloir énoncer une définition du temps qui soit précise, rassurante et opératoire. Cet obstacle, caractéristique de toutes les notions premières, donne au temps une aura non dénuée de mystère. Il confère aussi à ce livre, par bienheureuse contagion, « un peu de sérieux tout de même ».

Ensuite, il y a le paradoxe, et même le prodige, de la *réalité* même du temps. Puisque le passé n'est plus, que l'avenir n'est pas encore, puisque le présent lui-même a déjà fini d'être dès qu'il est sur le point de commencer, comment pourrait-on concevoir un *être* du temps ? Comment pourrait-

il y avoir une existence du temps si le temps n'est ainsi composé que d'inexistences ? Convenons qu'il serait bien hasardeux de fonder la réalité du temps sur une réalité aussi peu réelle que celle de l'instant, qu'on se représente toujours comme une sorte d'atome temporel, de point-limite insécable suspendu entre deux néants : l'instant n'est qu'un frisson, et un frisson n'a guère de poids ontologique. Alors, si « l'instant n'a pas de temps », comme le notait Léonard de Vinci dans ses *Fragments*, comment le temps pourrait-il être fait d'instants ? Par quelle alchimie ces admirables tremblements de temps pourraient-ils s'épaissir en durée ? À peine né, l'instant neuf doit passer à l'ancien, comme soldé avant l'heure, faisant du présent l'urgence d'un futur frémissant déjà dans les transes de l'imminence. Le temps est toujours disparaissant. « Il ne se montre que nié », dit Marcel Conche dans *Temps et Destin*. Son mode d'être serait-il de ne pas être ? Pourtant, si l'on devait penser que le temps n'est rien, il faudrait d'un seul coup nier la globalité de notre expérience humaine, ce qui fait tout de même beaucoup. Pas plus que nous ne pouvons concevoir l'existence du temps, pas plus n'en pouvons-nous concevoir l'inexistence. On le voit, le temps nous envoie promener sur la circonférence glissante d'un cercle vicieux.

Enfin, il y a le problème de l'identité du *maintenant*. Le maintenant, l'instant présent, nous apparaît toujours comme un seul et même instant, immuable en quelque sorte. Le présent est en effet la seule chose qui n'ait pas de fin et qui nous soit toujours... présente, à la différence du passé et du futur qui ne sont que posés par la pensée, sur le mode du souvenir ou de l'attente, mais qui ne sont pas à notre disposition. Aristote lui-même (suivi par Schopenhauer en particulier) avait souligné cette évidence que le temps présent est le seul vrai temps, mais c'était pour ensuite opposer cette invariance du présent à la mobilité du maintenant : « Or l'instant est, en un sens, le même, en un sens non ; en tant qu'il varie d'un moment à l'autre, il est

différent ; quant à son sujet, il est le même. » Cette opposition irréductible entre la permanence du maintenant et sa propre dynamique, entre sa présence et sa fuite, entre son évidence et sa facticité, c'est bien ce que l'on appelle un paradoxe. Comment articuler l'instant, dans ce qu'il a d'« arrêté », avec le mouvement ? Par quel mécanisme l'instant se succède-t-il à lui-même ? Dans ses *Confessions*, saint Augustin s'était posé une question tout aussi cruciale : « Comment puis-je à la fois être dans le présent et prendre suffisamment de recul pour m'apercevoir que le temps passe ? »

Résout-on ces difficultés en supposant comme Aristote que « le temps est le nombre du mouvement, selon l'avant et l'après », en quoi il déroule la succession des moments qui scandent les changements auxquels sont soumis les phénomènes ? Ou bien en en faisant comme Platon dans le *Timée*, à mi-chemin entre Parménide et Héraclite, l'« image mobile de l'éternité immobile » ? Faut-il proclamer avec saint Augustin (suivi par Husserl) que le temps ne s'écoule que dans l'âme, étant donné que l'objet de l'attente (futur) devient celui de l'attention (présent), puis celui de la mémoire (passé) ? Quant à Bergson, a-t-il raison de suggérer que le temps est une pure intuition de la conscience ? Quelqu'un est peut-être capable de répondre à ces questions mises en vrac. Mais l'auteur de ces lignes, lui, est bien dans l'embarras.

Il est toutefois une autre question qui ne laisse pas d'interpeller les physiciens, et même de les agacer, car ils n'ont pas les moyens d'y répondre. Elle concerne la place du temps dans l'univers : le temps est-il nécessairement associé à des événements physiques se produisant dans le cadre de l'univers, telle l'oscillation d'un pendule, ou bien s'impose-t-il de lui-même comme une sorte d'arrière-plan « transcendantal », comme disent les philosophes ?

Philon d'Alexandrie et saint Augustin avaient perçu la profondeur de cette interrogation. Afin de contourner la

question délicate (mais peut-être sotte) de l'activité divine avant la création du monde (que faisait Dieu avant de superviser le bon déroulement de la Genèse ?), ils firent remarquer qu'il ne pouvait y avoir en l'occurrence d'*avant* parce que le temps fait partie intégrante de l'ordre créé : il est créé avec les choses sans pouvoir être confondu avec aucune, mais sans non plus pouvoir en être séparé. Il est donc contemporain de l'univers lui-même. La thèse de Philon, par exemple, consiste à dire qu'« étant donné que le temps est un espace mesuré, déterminé par le mouvement universel, et que le mouvement ne peut pas être antérieur à l'objet en mouvement, mais doit nécessairement apparaître soit après lui, soit au même moment, il s'ensuit nécessairement que le temps est, lui aussi, ou contemporain ou postérieur au monde ». Le problème est que ce jugement, aussi élégant qu'il semble être, est à la fois imparable et arbitraire, comme le sont souvent les propositions métaphysiques. Nous pouvons certes dissenter à loisir, et même à l'infini, sur la question de savoir si l'univers a eu un prélude temporel, ou si tout – y compris le temps – a commencé avec lui. Mais faute de données et de preuves à notre disposition, nous ne pourrions pas conclure.

À la fin du XVIII^e siècle, la question de la nature du temps reviendra tourmenter Emmanuel Kant, qui est sans doute le philosophe que les physiciens connaissent le mieux. Que dit l'auteur de la *Critique de la raison pure* à propos du temps ? Souvenons-nous que, en subordonnant le temps à l'âme et en le dégageant ainsi du mouvement général des choses, saint Augustin avait ouvert la voie à une perspective « transcendantale ». Kant y engouffre tout son système de pensée : « Le temps n'est qu'une condition subjective de notre (humaine) intuition (qui est toujours sensible, c'est-à-dire qui se produit en tant que nous sommes affectés par les objets), et il n'est rien en soi en dehors du sujet. » Ce qui ne l'empêche pas, poursuit Kant, d'être « nécessairement objectif par rapport à tous les phénomènes et, par suite, par

rapport à toutes les choses qui peuvent se présenter à nous dans l'expérience ». Le temps ne peut donc être dissocié du mouvement de la pensée qui perçoit, il n'est rien en soi dès que l'homme est oublié. Kant le pose comme l'un des *a priori* de la pensée conceptuelle : il n'y a pas d'expérience possible sans le temps, qui nous offre la succession ; l'espace permettant, de son côté, la simultanéité. Il n'est pas non plus de représentation sans cet *a priori* transcendantal qui autorise les énoncés de la science. Le temps n'est pas un concept, c'est une intuition pure. D'où la thèse kantienne de l'« idéalité transcendantale du temps » : le temps est idéal en ce sens qu'il n'est pas un être ou une chose qu'on pourrait comprendre avec des concepts (*idéal* s'oppose ici à *réel*), et il est par ailleurs transcendantal en ce qu'il préexiste aux objets de l'expérience (il est *a priori*) et en conditionne la connaissance. Au grand soulagement des savants de toute sorte, cette idéalité transcendantale du temps garantit le réalisme empirique requis par toute science, puisque l'appréhension du monde sensible y trouve sa condition nécessaire.

Cette thèse est séduisante, et tout, grâce à elle, pourrait aller pour le mieux dans le meilleur des mondes... s'il n'y avait pas la relativité restreinte d'Einstein. Entremêlant l'espace et le temps, celle-ci semble en effet récuser la thèse de Kant, qui considérerait ces deux entités comme deux *a priori* distincts et séparés de la sensibilité, point de vue qui n'est guère compatible qu'avec le schéma newtonien. Dès lors, que reste-t-il du système kantien ? Ses fondements les mieux assis ne se trouvent-ils pas ébranlés ? Que donnerait, sur ce point, un dialogue entre physiciens et philosophes ? Ou mieux encore, une joute oratoire ?

La controverse Einstein-Bergson

Une heure n'est pas une heure, c'est un vase rempli de parfums, de sons, de projets et de climats.

Marcel PROUST, *Le Temps retrouvé*.

Un dialogue de ce type eut lieu à la Société de philosophie de Paris, le 6 avril 1922, entre Einstein le physicien et Bergson le philosophe, à propos de temps et de relativité. « Prétendez-vous parler du temps tel que l'entend l'homme ordinaire ? » demande en substance Bergson à Einstein. « La question se pose ainsi : le temps du philosophe est-il le même que celui du physicien ? » résume Einstein avant de répondre sans hésiter que seule la science dit la vérité et qu'aucune expérience vécue ne peut sauver ce qu'elle nie. Bergson fut fort déçu par cette réponse péremptoire. Sans doute espérait-il qu'Einstein se rendrait à ses raisons, qui, après tout, étaient celles du plus élémentaire bon sens.

Il convient de bien comprendre les termes de cette opposition. Bergson avait, sur le temps, une thèse originale, qui le hanta toute sa vie. Il était obsédé par l'idée que notre intelligence se fait une représentation fausse de la nature réelle du temps. Préoccupée de noter des coïncidences plutôt que d'observer le temps qui s'écoule, elle substituerait inconsciemment à la durée un schéma mathématique simpliste, celui d'un temps à une dimension, homogène, continu et constitué d'instantanés qui se succèdent. Ce faisant, si l'on en croit Bergson, elle oublie de regarder en face la véritable nature de la durée, qui est progrès, création de formes nouvelles, invention continue, émergence jaillissante de nouveauté ininterrompue. Le temps n'a rien d'un sablier usant son sable ou d'une montre débitant le tic-tac monotone d'instantanés esseulés : la durée, inventant sans cesse, exclut nécessairement la répétition. Comme nous l'avons observé, ce point de vue n'est pas, en général, celui des physiciens. Il ne faut donc pas s'étonner que Bergson ait vivement critiqué la conception du temps qu'ont les scientifiques. Pour résumer son objection, il suffit de citer un

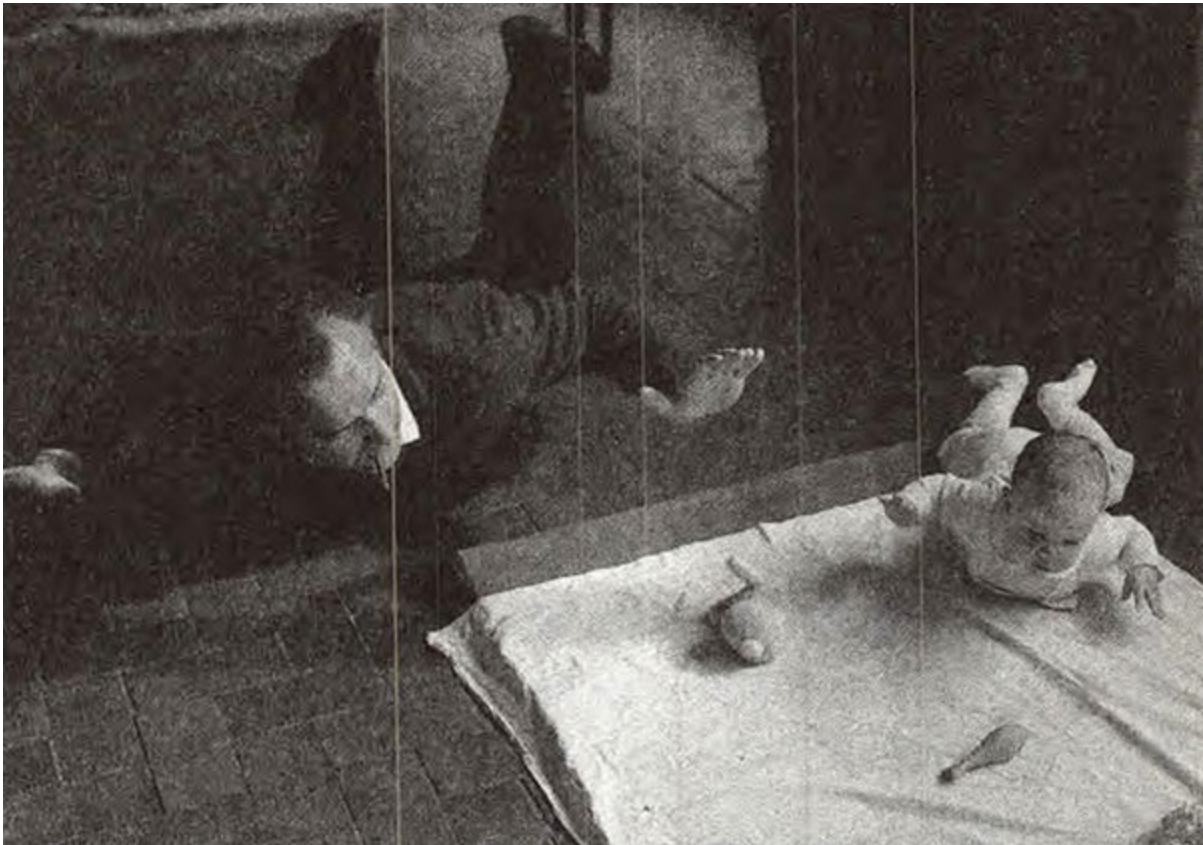
passage de la lettre qu'il écrivit à William James, en 1908 : « Je m'aperçus, à mon grand étonnement, que le temps scientifique ne dure pas, qu'il n'y aurait rien à changer à notre connaissance scientifique des choses si la totalité du réel était déployée tout d'un coup dans l'instantané, et que la science positive consiste essentiellement dans l'élimination de la durée. » Pour Bergson, ce constat rend le temps des scientifiques inconciliable avec les données de la vie intérieure, pour laquelle il n'existe pas de temps sans durée. La durée est la pâte même du temps. N'est-il pas vrai que nous ne percevons jamais l'instant comme ponctuel ? Le temps n'a-t-il pas toujours une certaine « épaisseur » ? Et n'apparaît-il pas, pour qui se détache d'une approche fonctionnelle du réel, comme le lieu de la liberté et de la création ? Soutenant le sens commun, lequel sait bien que le temps existe et que l'intuition de la durée le prouve, Bergson conclut que l'instant n'est qu'une abstraction imposée par l'intelligence qui ne comprend le devenir qu'en repérant des états immobiles.

Einstein, lui, affirme que le temps n'existe pas, ou du moins qu'il n'a pas d'épaisseur. Qui pis est, sa théorie de la relativité brouille, au grand dam du philosophe français, les repères du sens commun en montrant comment la perception du temps est liée au mouvement des observateurs et qu'à cet égard on peut concevoir un temps qui admettrait la coïncidence du présent éprouvé par l'un de ces observateurs avec l'avenir ou le passé d'un autre. Bergson n'accepte pas ce résultat. Dans son livre *Durée et Simultanéité*, publié en 1922, il commence par critiquer sévèrement la vision géométrique et dévalorisée du temps, fondée sur l'instant, qu'impose la physique : l'instant, d'après lui, n'est qu'une coupure artificielle qui aide la pensée schématique du savant, mais prive la durée de tout substrat concret. Une simultanéité ne saurait témoigner du flux de la durée.

La critique de Bergson reprend au passage les arguments que Zenon d'Élée utilisait pour fonder les paradoxes du mouvement auxquels il a laissé son nom : une flèche qui vole (une vraie flèche en bois, pas celle du temps !) ne peut pas occuper à chaque instant de son vol, disait-il, une position vraiment déterminée puisque, si elle occupait une telle position, elle serait immobile. Ensuite, Bergson tente désespérément de rendre la relativité de la simultanéité compatible avec le seul temps vrai à ses yeux, le temps « vivant ». Appliquée au paradoxe des jumeaux de Langevin, son interprétation consiste à dire que, si les durées physiques (mesurées par une montre, par exemple) sont effectivement différentes pour les deux jumeaux, les durées biologiques (ou psychologiques) sont, elles, identiques. Les succès de la relativité rendent cette assertion difficilement soutenable car elle conduit à un écartèlement allant jusqu'à la dissociation entre temps physique et temps psychologique. Mais cela ne veut pas dire qu'il faille rejeter en bloc l'argumentation du philosophe. Car, comme l'a montré Louis de Broglie dans son livre *Physique et Microphysique*, la conception bergsonienne du temps s'accorde assez bien avec celle de la physique quantique, qui conçoit qu'il puisse y avoir une « mobilité pure sans localisation précise ». C'est le sens du principe d'indétermination de Werner Heisenberg, qui interdit qu'un objet quantique puisse avoir en même temps une position et une vitesse bien déterminées.

Plus généralement, Bergson objecte à Einstein que le temps mathématique et déshumanisé du physicien n'épuise pas le sens du temps vécu et que, de toute façon, ni la science ni la métaphysique n'ont jamais rien dit qui vaille sur l'expérience du temps, essentiellement parce qu'elles se confient à l'intelligence qui est réfractaire à la durée dont le sens commun a l'intuition. Nous avons beau porter une montre au poignet, nous ne sommes pas réductibles à un chronomètre, ni même à une horloge parlante. C'est

pourquoi la pensée scientifique, et même la pensée tout court, se trompe toujours lorsqu'elle croit dire le temps. N'étant qu'un fragment de la vie, elle n'a pas les moyens de dicter ses règles à la vie. À trop schématiser le temps, on laisse certainement échapper quelques-unes de ses propriétés fondamentales. Sur ce point, le débat reste ouvert : lorsque nous examinons la beauté, la puissance et l'efficacité des théories physiques actuelles, oublieuses du temps, nous ne pouvons que donner raison à Einstein ; mais lorsque nous voyons un enfant qui grandit en inventant chaque jour de nouveaux gestes, nous percevons mieux la pertinence des objections de Bergson. Sa philosophie passe probablement comme lettre à la poste auprès des pères de famille attentifs.



Le temps invente-t-il ou ne fait-il que passer ?

Le temps de la vie est invention continue, apprentissage perpétuel, émergence ininterrompue de nouveauté, avec parfois, semble-t-il, des phases de

régression intempestives.

Qu'est-ce que ce temps-là a de commun avec les tic-tac répétitifs et esseulés dont est constitué le temps monotone des physiciens ?

Ph. © V. Winckler.

Reste que la furtivité de l'instant physique a du mal à rendre compte de l'épaisseur de la durée psychologique. *Chronos* et *tempus* rechignent à se confondre, la ponctualité de l'un s'accordant mal avec la continuité de l'autre. Einstein lui-même en convenait : « Il n'y a pas un temps des philosophes ; il n'y a qu'un temps psychologique différent du temps des physiciens. » L'opposition des arguments d'Einstein et de Bergson fournit une estimation de la distance qui sépare ces deux sortes de temps. L'affrontement de ces deux géants de la pensée posait indirectement une autre question, celle de savoir qui a autorité pour parler du temps. La réponse est certainement : personne, ou plutôt tout le monde. Dans le domaine de la pensée, le temps incarne la fin des privilèges. Il n'est l'apanage d'aucune discipline et nul ne peut, sur un tel sujet, revendiquer une quelconque préséance. Mais on sait bien que la fin des privilèges ne signifie pas celle des affrontements. Dès lors, le mieux n'est-il pas d'écouter avec la même attention ce qu'ont à dire sur le temps les philosophes, les savants, les musiciens, les poètes, et tous les autres hommes, et ensuite de se faire sa propre opinion ? Après tout, si le temps était un bateau (voire une galère), nous serions tous dans le (la) même.

Le temps de l'action

Comment vivre sans inconnu devant soi ?

René CHAR.

Quelqu'un a dit qu'il est toujours difficile de faire des prédictions, surtout... quand elles concernent l'avenir ! L'avenir est imprévisible puisqu'on ne peut connaître que ce qui est, non ce qui n'est pas encore. Pour connaître l'avenir, il faudrait attendre qu'il se soit produit, et alors il ne sera plus à venir ! Tout futur est, par nature, ouvert et opaque à la fois.

Toutefois, rien n'interdit de parler de ce qui va advenir en termes de scénarios, c'est-à-dire en évoquant une séquence inventée d'événements, un enchaînement artificiel, fabriqué et possible de causes et d'effets. L'évolution récente de nos sociétés, tout imprégnée des retombées et des projets de la science, interdit d'oublier l'inévitable composante technicienne de tels scénarios. S'ils prétendent à la plausibilité, leur structure ne peut être que du genre : si nous faisons ceci, nous obtiendrons cela. Cette manière de procéder n'est pas neutre puisque, en nous projetant dans l'avenir, elle interdit d'éluder la question de notre responsabilité, dont David Hume prétendait déjà au XVIII^e siècle qu'elle était le problème « le plus épineux de la métaphysique », ce qui à l'époque n'était pas peu dire.

Temps et responsabilité

J'aurai besoin, aussi je le note en passant, de participes futurs et de conditionnels.

Samuel BECKETT, *L'Innommable*.

L'espace est la marque, et même la démonstration, de notre puissance. Nous pouvons l'aménager, l'adapter, le parcourir en tous sens et à toute vitesse, y faire des zigzags, modifier son apparence et ses formes. Le temps, lui, est plutôt la marque de notre faiblesse : il n'est pas un lieu de promenade où nous pourrions aller et venir à notre gré, il n'est pas malléable, on ne peut le manipuler d'aucune façon, il s'impose à nous sans rien céder à la diplomatie, il nous use tous à petit feu, presque à notre insu. Le temps, avatar muet de nos impuissances, est la borne impérieuse de notre condition.

Nous ne maîtrisons pas les conséquences lointaines de nos actions. On pourrait objecter qu'il en a toujours été ainsi, l'homme n'ayant jamais eu les moyens de façonner à sa guise son propre devenir. Ce serait sans doute inexact : dans l'Antiquité ou encore à l'âge classique, on comptait sur la nature, perçue comme régulatrice, pour compenser les désordres humains ou assurer la bonne marche des affaires ; on tablait sur sa puissance réparatrice, dont la cicatrisation des plaies apparaissait comme le modèle. La technologie moderne, et en particulier l'ingénierie du vivant (terrible oxymoron* !), a mis à l'épreuve, et défait partiellement, ce pouvoir réparateur de la nature. Elle a rendu notre monde fragile et vulnérable. Les conséquences de l'action humaine laissant désormais sur la face de la Terre des traces durables, voire définitives, nous avons perdu à tout jamais le droit d'être négligents. L'apocalypse est peut-être un phénomène rampant, qui sait ?

Il est des questions à propos desquelles, consciemment ou non, nous aurons choisi à la place de nos descendants, les

plaçant dans des situations qu'ils ne pourront guère que subir. Une telle filiation n'a *a priori* rien de scandaleux : le monde que chaque génération a trouvé à sa naissance n'a jamais été neuf ni épuré de tout passé. Il y a toujours eu héritage d'abord, transmission ensuite. Simplement, les corrélations de ce type sont devenues beaucoup plus amples qu'autrefois et elles durent pendant des périodes beaucoup plus longues. Désormais, une sorte de communion matérielle, promue par la technologie, lie étroitement les hommes à travers l'espace et le temps. La Terre est devenue une gigantesque sphère conductrice, et même supraconductrice, connectée dès aujourd'hui à ce qu'elle sera demain et après-demain.

La pente spécialisatrice de la civilisation moderne nous avait poussés à séparer les aspects techniques des aspects moraux de nos actions. Cette simplicité, pour commode qu'elle ait été, ne peut plus avoir cours. Les dimensions technique, sociale et éthique de toute action d'envergure sont devenues indissociables. On ne peut étudier l'une sans en même temps réfléchir aux autres, car chacune des décisions qui sont prises à grande échelle illustre les fins que nous poursuivons, les négligences que nous tolérons et les valeurs auxquelles nous croyons. Toute trace que nous laissons sur le monde est comme une signature.

L'homme moderne a donc quelques raisons de se méfier de Prométhée, qui passe pour avoir enseigné aux mortels l'ensemble du savoir, et des mauvais tours qu'il pourrait jouer. Que deviendra, ultimement, la nature livrée à l'homme ? La technologie n'est-elle pas en train de conférer à l'humanité un pouvoir grandissant sur les choses, sur le monde et sur elle-même ? Dans certains cas, son influence risque de jouer sur des temps très longs. Toute action qui relève d'elle acquiert donc, au-delà de sa dimension historique, une portée nouvelle qui modifie le lien entre l'homme, la nature et le temps. La nature, autrefois, nous apparaissait comme le dépositaire d'une sagesse implicite.

Elle était une sorte d'exemple sur lequel l'homme devait modeler ses actions et aussi, dans une certaine mesure, sa façon de penser. Désormais, il faut plutôt voir la nature à l'image de ce qu'elle est en train de devenir : un réceptacle, régulé mais fragile, capable de recevoir toutes les empreintes que font sur elle les actions et les idées. D'une certaine façon, la longévité de l'avenir repose au creux de nos mains. De nous dépend que le long terme ne tourne pas court. Par le biais du temps, notre responsabilité se trouve engagée, comme si l'avenir avait force sur nous.

De façon très incisive, c'est bien elle, la question de la responsabilité, qui échoit à notre génération, sans que nous entrevoyions d'échappatoire. On peut *a priori* s'en étonner, car l'inflation des droits nous donne plutôt l'illusion que nous serons bientôt quittes du catalogue des devoirs ; les avancées de la technologie forcent les limites du possible, promettant toujours plus d'insouciance, de sécurité, de liberté. C'est pourtant dans ce contexte apparemment libérateur que la question de nos responsabilités resurgit, avec sa cohorte de doutes et d'angoisses, au moment même où on commençait de la croire enfuie. Car, comme l'a écrit le philosophe Hans Jonas dans *Le Principe responsabilité*, « la technique moderne a introduit des actions d'un ordre de grandeur tellement nouveau, avec des objets tellement inédits, que le cadre de l'éthique antérieure ne peut plus les contenir ». Auparavant, l'éthique parlait du rapport de l'homme aux autres hommes, elle se souciait de justice, de loyauté, de devoir, de commandements. Or, se demande Hans Jonas, n'avons-nous pas dorénavant une relation de responsabilité aussi à l'égard de la nature, précisément parce qu'elle se trouve maintenant en notre pouvoir ? Un tel lien est assurément nouveau, non seulement du point de vue de l'histoire, mais aussi du point de vue de l'éthique. C'est, en somme, de l'inédit en philosophie.

Ce changement de perspective est très lié à notre siècle. Il vient de ce que la technique a depuis peu évolué beaucoup

plus vite que la culture, au point que nous ne sommes plus en mesure d'élaborer une représentation générale des développements de toute sorte qui sont en train de s'accomplir. Aussi avons-nous désormais le sentiment d'être dans le temps de tous les possibles, qui est aussi, par les choix qu'il offre et les questions qu'il invente, le temps des grands désarrois. Nous en venons à nous demander si l'abus de notre domination sur la nature pourrait conduire à la destruction de ce que nous avons appris à dominer. Dans le doute, que devons-nous faire pour garantir que le pouvoir de l'homme ne deviendra pas une malédiction pour lui ?

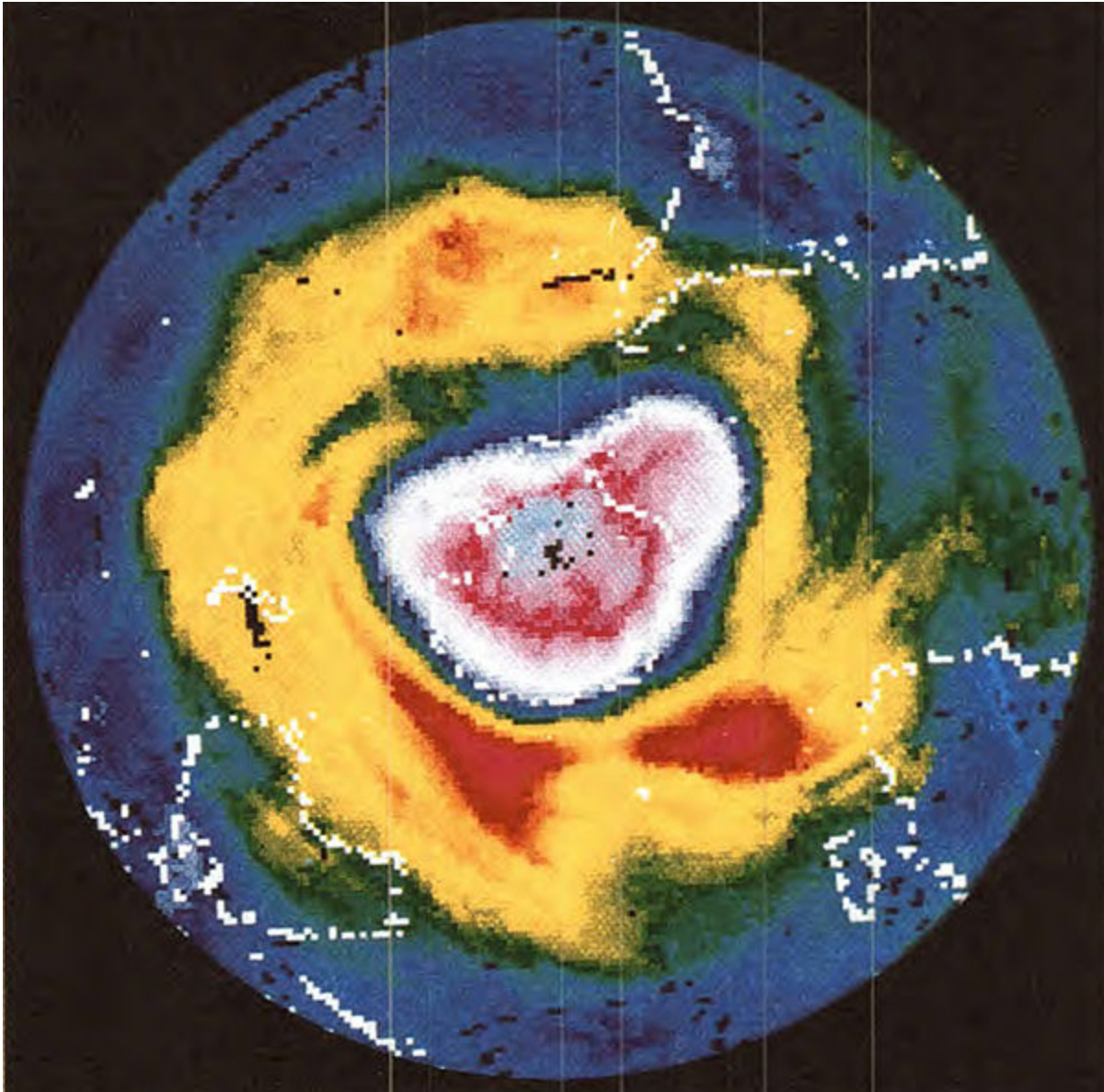
Cette question tiraille nos consciences et creuse nos traits, car les termes de sa réponse révèlent des antagonismes. D'une part, l'accroissement de notre puissance suppose un accroissement équivalent de nos responsabilités et de notre vigilance. Mais d'autre part, la rigueur obligatoire de la responsabilité est en contradiction avec les discours de libération, d'émancipation, d'évasion, de jouissance qui sont communément tenus. La responsabilité en vient à ressembler à une entrave dont l'immensité même invite à l'esquive, c'est-à-dire à son exact contraire, l'irresponsabilité. Nous assistons en somme au gonflement simultané de deux tendances opposées. D'un côté, une puissance dont les conséquences possibles impliquent qu'on limite son pouvoir d'action. De l'autre, une crise portant justement sur la notion même de limitation, d'interdit, de renoncement. Ce paradoxe est l'un des inconforts de la modernité. Son dépassement reste l'un de ses principaux défis.

Dans cette situation, comment élaborer une « éthique de l'avenir » ? Sur quels principes la fonder ? Lorsque nous évoquons l'avenir et les dangers qui planent sur lui, nous ne pouvons plus déclarer « après nous le déluge ! » Le cynisme ne sied guère aux périodes de grave danger. Mais le rejet du cynisme en soi seul ne suffit pas à faire une solution. Nous devons en outre définir de quelle manière l'avenir qui, par

définition, n'est pas encore nous oblige déjà. Par quoi sommes-nous aujourd'hui liés aux hommes de demain ? Dans quelle mesure les humains qui seront sur Terre dans plusieurs centaines de milliers d'années font-ils déjà (ou encore) partie de cette entité à la fois proche et indistincte que nous nommons « autrui » ? Ces questions, évidemment, n'intéressent pas que les théoriciens de l'éthique. Qu'il s'agisse du problème des déchets nucléaires, de celui de la biosphère (l'effet de serre, la couche d'ozone, la pollution des eaux) ou des avancées vertigineuses de la génétique, on se rend bien compte que les conséquences à long terme de l'agir technologique, en partie imprévisibles, risquent d'être irréversibles. Elles concerneront d'autres êtres que nous-mêmes, dont nous ne pouvons anticiper ni les actes ni les sentiments. Alors, afin de prévenir ou de limiter les éventuels dégâts à venir, ne faut-il pas prévoir d'installer, dans cet océan d'incertitude qu'est l'avenir, des îlots de sécurité, et jouer, au minimum, la prudence ? C'est la thèse de Hans Jonas, qui va même plus loin. Partant du constat que nous éprouvons tous un sentiment de menace, indéniable et objectif, il propose de jouer sur une « heuristique de la peur ». Cette dernière recommande de « consulter nos craintes préalablement à nos désirs », et de « prêter davantage l'oreille à la prophétie de malheur qu'à la prophétie de bonheur ». Les promesses de la technique moderne s'inversant en menaces, il faut désormais considérer la peur non plus comme faiblesse ou pusillanimité, mais comme signal mobilisateur précédant l'art de se poser les bonnes questions. Cette nouvelle forme de peur ne relève plus du simple registre émotionnel. Elle est consciemment suscitée à seule fin d'avertir ; elle est artificiellement produite pour stimuler la réflexion et déclencher des interrogations. À ce titre, elle est salutaire, et c'est pourquoi elle ne peut plus être méprisée.

Hans Jonas préfère donc réfléchir sur le pire plutôt que sur le meilleur. Sa conception inédite de la responsabilité fait la

part belle au pessimisme : toute pensée de l'avenir qui prendrait la forme d'une utopie est d'emblée condamnée. Mais cette peur qu'il met en avant n'est-elle pas une passion intrinsèquement triste ? Et qu'en serait-il de nos enthousiasmes et de nos appétits si elle venait à dominer ? On le voit, la thèse de Jonas peut être discutée, ne serait-ce que parce que la peur, qui est un sentiment, ne suffit pas à faire une morale : la litanie des risques, même majeurs, n'a en elle-même aucune valeur éthique indiscutable. Reste que cette thèse a le mérite de fournir des repères à une époque qui avoue en manquer, et aussi de militer contre l'inertie dont le philosophe Johann Gottlieb Fichte disait qu'elle est le véritable péché originel en l'homme. De plus, elle change la perspective sous laquelle nous devrions envisager l'avenir. Plutôt que de dire qu'il est ce qui vient vers nous, il faut désormais le voir comme ce vers quoi nous décidons d'aller. Ce renversement, d'apparence byzantine, n'est pas une pirouette : il modifie notre propre rapport aux temps qui s'annoncent en nous mettant en demeure de les anticiper. Bien sûr, l'avenir ne sera pas ce que, dans nos rêves les plus fous ou dans nos pronostics les plus optimistes, nous aurions désiré en faire, car trop d'éléments nous échappent pour que nous puissions croire que nous le déterminons.



La couche d'ozone et son célèbre trou.

La capacité industrielle de l'homme a atteint un niveau où il est possible, en quelques décennies, de produire des effets à une échelle mondiale. Récemment, on a attribué aux chlorofluorocarbures (CFC), utilisés en particulier dans l'industrie du froid et les bombes aérosols, la diminution par voie chimique de la quantité d'ozone stratosphérique, qui protège les organismes vivants du rayonnement solaire ultraviolet. Les processus d'élimination des CFC dans l'atmosphère étant très lents, un siècle au moins sera nécessaire pour un retour aux concentrations initiales. Les conséquences à long terme de l'agir technologique engagent dès aujourd'hui la responsabilité de l'homme.

Ph. © Laboratory for Atmospheres, NASA Goddard Space Flight Center/SPL/Cosmos.

Mais nous devons réfléchir aux moyens d'empêcher qu'il accouche du pire des mondes. Au lieu d'attendre passivement que l'avenir se contente d'advenir, tentons de faire en sorte que son visage ne soit pas hideux. Un tel vœu pieux est évidemment plus facile à énoncer qu'à réaliser, car les détails de sa mise en œuvre n'ont pas la simplicité des principes. L'éthique n'est pas toujours à portée de la pratique, et cette dernière n'a pas forcément l'élégance de la première (Hans Jonas a été légitimement critiqué sur ce point). Néanmoins, nous sentons confusément que tout cela demande de la réflexion, de l'action, peut-être des renoncements, en tout cas une volonté d'anticipation sans laquelle l'avenir perdrait toute conaturalité avec notre présent, lui serait absolument étranger. « L'avenir, c'est du passé en préparation », disait le très regretté Pierre Dac. Cette phrase est vraie au point d'ignorer la flèche du temps : on peut y bouleverser la chronologie pour lui faire dire, aussi, que « le présent, c'est du futur qui se prépare ».

Certaines des conséquences de la technologie nous projettent vers des futurs si lointains que l'humanité se surprend à devoir les envisager pour la première fois de son histoire. Jamais auparavant elle n'avait eu à s'imaginer aussi loin dans l'avenir. Par exemple, on parle, pour régler le problème des déchets nucléaires, de les enfouir profondément pendant des centaines de milliers d'années afin de protéger les générations futures des radiations diverses qu'ils émettront. Or, l'homme d'aujourd'hui ne sait rien de ce que seront l'homme et la société de l'an 500 000 après Jésus-Christ. Il doit envisager toutes sortes de scénarios plus ou moins rationnels, sans rien pouvoir exclure de façon certaine puisque rien n'est *a priori* impossible. Pour sentir l'immensité et l'étrangeté de ces temps inhumains, il suffit, remarque le paléontologue Yves Coppens, de remplacer les années par des francs (le temps, c'est aussi de l'argent, le moment est venu de le rappeler).

Dans ce pragmatique système d'unité, le siècle, qui correspond plus ou moins à la durée historique maximale que nous puissions conceptualiser, « vaut » cent francs. Mais les durées dont nous parlons, elles, valent plusieurs centaines de milliers de francs. Tous les ménages comprennent en général assez vite que deux budgets aussi dissemblables ne se gèrent pas de la même façon.

Comment l'homme évoluera-t-il pendant cette période ? Est-il seulement raisonnable de penser que, mis à part quelques différences culturelles, il sera *grosso modo* notre « semblable » ? Peut-on, sans trop céder aux préjugés ni aux fantasmes, concevoir les grandes lignes d'une aussi longue histoire ? Et que devient au juste la « condition humaine » quand on la projette aussi loin dans l'avenir ? Ces questions nous embarrassent car elles sont, d'une certaine façon, impures : elles connotent vaguement le prophétique, et pourtant elles contiennent une date, un nombre d'années bien défini qui, d'une certaine façon, les rend concrètes. Elles ne portent pas sur la fin ultime du monde, mais seulement sur son visage lointain. Cela met mal à l'aise le philosophe, lequel, comme le croyant, est traditionnellement beaucoup plus à son affaire lorsqu'il doit parler de l'éternité ou de l'instant, de l'origine ou de la fin absolues, que lorsqu'il doit parler d'une période chiffrée. Pour la pensée, un million d'années, c'est beaucoup trop, et c'est beaucoup trop peu.

Qu'en sera-t-il de l'homme dans un million d'années ? Tout, n'importe quoi paraît possible, surtout si, inversant la flèche du temps, on se demande symétriquement ce qu'il en était de l'homme voici un million d'années. L'étrangeté qui sépare notre présent de ce que furent les ères secondaire ou tertiaire n'est-elle pas inouïe ? Si l'on transpose au futur lointain un hiatus d'ampleur équivalente, que trouvera-t-on ? Nul ne peut dire. Quelque débridées soient-elles, notre imagination et nos spéculations sont certainement trop courtes, trop désuètes, trop naïves et trop encombrées pour

donner une figure plausible à nos très lointains descendants. Pour s'en rendre compte, il suffit d'écouter les prophètes plus ou moins doctes dissertant sur ce que sera le XXI^e siècle, à la fois si proche et si incertain. Ils se trompent certainement autant que ceux qui tentèrent un siècle auparavant, avec une assurance comparable, le même exercice. Leurs discours et leurs ululements, mettant à nu le plus trouble et le plus profond de leur être, révèlent davantage leurs peurs et leurs fantasmes, leurs espérances et leurs turlutaines, qu'une véritable pré-vision du prochain siècle. Alors, pour ce qui est des prédictions pour le prochain million d'années, nous sommes très à l'abri de l'exactitude à laquelle la physique nous a hypnotiquement habitués...

Nous savons bien que, pour l'étude du passé, même pour des durées beaucoup plus courtes, les historiens ne peuvent déjà pas se satisfaire de la vision traditionnelle du temps, celle d'un axe de coordonnées purement géométrique sur lequel ils pourraient ranger chronologiquement des faits minutieusement étiquetés. Comme l'a montré Fernand Braudel, une bonne représentation historique du temps fait nécessairement référence à plusieurs temps, à des durées, à des cycles, à des temporalités qui s'enchevêtrent et constituent l'épaisseur même de l'histoire. Tous ces rythmes hétérogènes se combinent en la synchronie de plusieurs temps, qui cassent l'unité de la durée et rendent quasi impossible la restitution exacte et complète des événements historiques. Cette difficulté devient encore plus insurmontable quand il s'agit, non plus de dire le passé, mais de prédire l'avenir. Le temps de l'histoire n'est jamais celui de la physique. Il est moins sec et plus nouveau. C'est un temps polychrone et hybride.

Une autre cause d'incertitude vient brouiller le petit jeu de la prédiction lointaine. Elle est liée à ce que l'on appelle l'accélération de l'histoire, si récurrente qu'on en a fait un lieu commun. Elle devient encore plus manifeste si l'on inclut dans l'histoire la préhistoire. Cinq cents milliers

d'années ont séparé l'invention du feu de celle de l'arme à feu, mais six cents ans ont suffi pour passer de l'arme à feu au feu nucléaire. Dans un registre moins guerrier et plus récent, citons l'exemple spectaculaire des transports : avant-hier, Marseille était à une semaine de Paris, hier à une journée, aujourd'hui à quatre heures ; et demain, tout sera à un quart d'heure de tout. Mille autres exemples pourraient venir confirmer que l'idée de progrès contient sa propre amplification et suscite ses propres vertiges. Qu'il s'agisse d'armes, d'outils, d'ordinateurs ou de voitures, on met vite le progrès au rebut. À peine nées, les nouveautés se périment, et rares sont les fabricants qui ne proposent pas chaque année, au mépris du sens des mots, une « nouvelle génération ». L'accélération de l'histoire s'accélère donc d'elle-même, victime de sa propre dynamique. À ce rythme, jusqu'où ira-t-elle ? On peut se demander où trouver un point fixe dans un contexte aussi mouvant. Existe-t-il seulement un repère, même mobile, qui puisse nous servir d'assise ? Notre monde, en pur devenir, semble échapper à toute forme d'arrêt et de repos. Étant de moins en moins prédictible, il donne de plus en plus raison à Héraclite. Paradoxalement, c'est peut-être le signe qu'il est temps de le penser comme Parménide. Simone Weil faisait judicieusement observer qu'il faudrait dire des choses éternelles pour être sûr qu'elles soient d'actualité.

Temps et destin

Je me souviens d'une horloge coupant des têtes pour indiquer les heures.

Tristan TZARA, *L'Homme approximatif*.

Il est certaines activités que l'on accomplit pour « tuer le temps », comme s'il était parfois préférable qu'il soit mort. Cette boutade trahit une vérité profonde : toutes nos

réflexions sur le temps sont certainement, sans que nous en ayons conscience, imprégnées par l'idée – et donc la crainte – de la mort. Nous disions plus haut que l'avenir, comme suite d'événements, est largement imprévisible, quand bien même nous nous efforcerions d'y introduire des programmes, des plans ou des régularités. Ce n'est pas tout à fait exact. Chacun de nous mourra. Loin de pouvoir tuer le temps, c'est lui qui nous dévore, comme le cruel titan Cronos de la mythologie dévorait ses enfants au fur et à mesure que son épouse Rhéa les mettait au monde. Son flux nous conduit tous au cimetière, sans exception. Notre mort est donc un événement certain, quoique à venir. Chacun sait constamment qu'un moment doit survenir pour lui où il n'y aura plus ni présent ni avenir. Un tel moment appartient en propre à chacun de nous, même si nous ignorons sa date. Nous ne pouvons pas le partager, car personne ne mourra à notre place. D'une certaine façon, le temps nous sépare déjà, ici et maintenant. C'est ce que Tolstoï a magnifiquement analysé dans *La Mort d'Ivan Ilitch*. Le personnage principal, Ivan Ilitch, atteint d'un cancer de l'intestin, se voit mourir à petit feu et se trouve progressivement séparé des autres, les parents, les proches, les vivants. Le temps est un imparable principe d'individuation. Face à lui, un autre que moi ne peut pas être moi.

Le temps nous est compté, nous n'en avons qu'une part, plus ou moins longue, mais finie. L'écoulement du temps ne va pas sans pertes. Au fil de ses raclures, il mène au tragique, à l'« irréparable outrage », à la mort. « Le destin, cet anéantisiteur », lâcha Rilke un jour de moral bas. Pourtant, la vie serait proprement absurde si nous ne pouvions en projeter la fin. N'est-ce pas le sentiment de notre finitude temporelle qui ordonne nos vies sur des projets ? Parce qu'il a, pour nous, un terme, le temps est « puissance destinale », selon l'expression qu'emploie Marcel Conche dans *Temps et Destin*.



Vanité.

Toutes nos réflexions sur le temps portent, aussi, plus ou moins directement, sur notre mort. Nous avons beau nous agiter ou nous distraire, nous savons constamment qu'un moment doit survenir où il n'y aura plus ni présent ni avenir.

Tous nos remuements seraient-ils divertissements chimériques ?

La distance est certainement courte, qui sépare la vanité de la grandeur. Renard de Saint-André, Vanité. Marseille, musée des Beaux-Arts, palais Longchamp.

Ph. © Giraudon.

C'est pourquoi toutes nos réflexions sur le temps portent aussi, plus ou moins consciemment, sur notre mort. Inversement, à réfléchir sur le temps, nous nous sentons irrémédiablement mortels. L'avenir est nécessairement éprouvé par les êtres finis que nous sommes comme une anticipation de la mort. Ne sommes-nous pas tous des « galériens enchaînés à la mort », comme disait Kierkegaard le mélancolique ? Plus généralement, le temps est le support implicite de toute pensée de la genèse et de l'origine, de l'histoire et de la destinée. Il est cette pure inquiétude dont toutes les vies humaines sont imprégnées. C'est pourquoi toute évocation du temps est chargée d'angoisses, de spleens, de fantasmes, d'espérances. Il n'y a qu'à examiner notre volonté, obstinée mais utopique, de retrouver le paradis perdu, de faire renaître le phénix, de revenir en arrière (le mot nostalgie vient du grec *nostos*, qui signifie « retour ») ; il n'y a qu'à sentir notre désir farouche de nous réincarner, de tendre à l'immortalité ; il n'y a qu'à voir notre fol mais persistant espoir d'inventer la machine à remonter le temps, ou de découvrir le mouvement perpétuel. Tous ces désirs, qui sont peut-être les plus fonciers de notre être, ne sont-ils pas engendrés par le sentiment d'impuissance que nous éprouvons face à l'irréversibilité du temps ? La flèche du temps n'est-elle pas l'image mobile de l'immobile épée de Damoclès ?

Il existe des manières efficaces d'échapper à cette angoisse. Nous pouvons par exemple pencher pour la stratégie de l'évitement et de l'esquive, comme nous y invite à sa manière Baudelaire, quelque part dans ses *Petits Poèmes en prose* : « Pour ne pas sentir l'horrible fardeau du Temps qui brise vos épaules et vous penche vers la terre, il faut vous enivrer sans trêve. Mais de quoi ? De vin, de poésie ou de vertu, à votre guise. Mais enivrez-vous. » Les plus sobres d'entre nous essaieront plutôt (ou aussi) de transcender cette angoisse en se fabriquant un bouclier contre la flèche pointue du temps. Ils feront des enfants ou

des livres, créeront une œuvre immortelle, laisseront leur nom dans l'histoire, acquerront considération, notoriété et gloire, s'anesthésieront d'occupations multiples, recourront à la chirurgie esthétique, posséderont des choses qui ne s'usent pas (de la pierre ou des pierres). Ainsi croyons-nous oublier, dans l'illusion de durer, de faire face à notre destin de mortel. Mais la mort, en fin de compte, ne se laisse jamais berner. Avec elle, nul biais ne dure et aucun leurre n'aboutit jamais.

L'esprit de clan ou d'équipe fournit une autre voie échappatoire provisoire. Le fait d'appartenir à une communauté, à une Église, à une nation donne en effet le sentiment d'être un élément passager d'un grand corps immortel. Le groupe survivant à la mort de chacun de ceux qui le composent, aucun de ses membres ne meurt tout à fait quand il meurt. Les membres sont autant de maillons temporaires pour une chaîne qui n'a pas d'âge. Toute communauté ancienne et stable offre ainsi l'immortalité par délégation, l'éternité à temps partiel en quelque sorte. Les rites, les pratiques, les commémorations, les anniversaires sont autant de tentatives qui vont dans ce sens : elles installent des cycles et des répétitions au sein du temps linéaire et fuyant. Mais de toutes les parades au temps destructeur, l'amour, ou plutôt l'Amour, reste la plus belle, la plus joyeuse et la plus tonique, même si elle n'est peut-être pas moins illusoire que les autres. « Ce que j'ai aimé un jour, que je l'aie gardé ou non, je l'aimerai toujours », déclare André Breton dans *L'Amour fou*. Ce « toujours »-là contient bien des germes d'immortalité, à la condition de ne retenir de l'amour que ses « heures de triomphe » et d'avoir l'esprit troubadour. Comme Shakespeare qui, dans l'un de ses *Sonnets*, veut croire que le temps n'a pas tous les pouvoirs : « Et pourtant fais le pire, vieux Temps ! Malgré l'injure, par mes vers mon amour est jeune éternellement. »

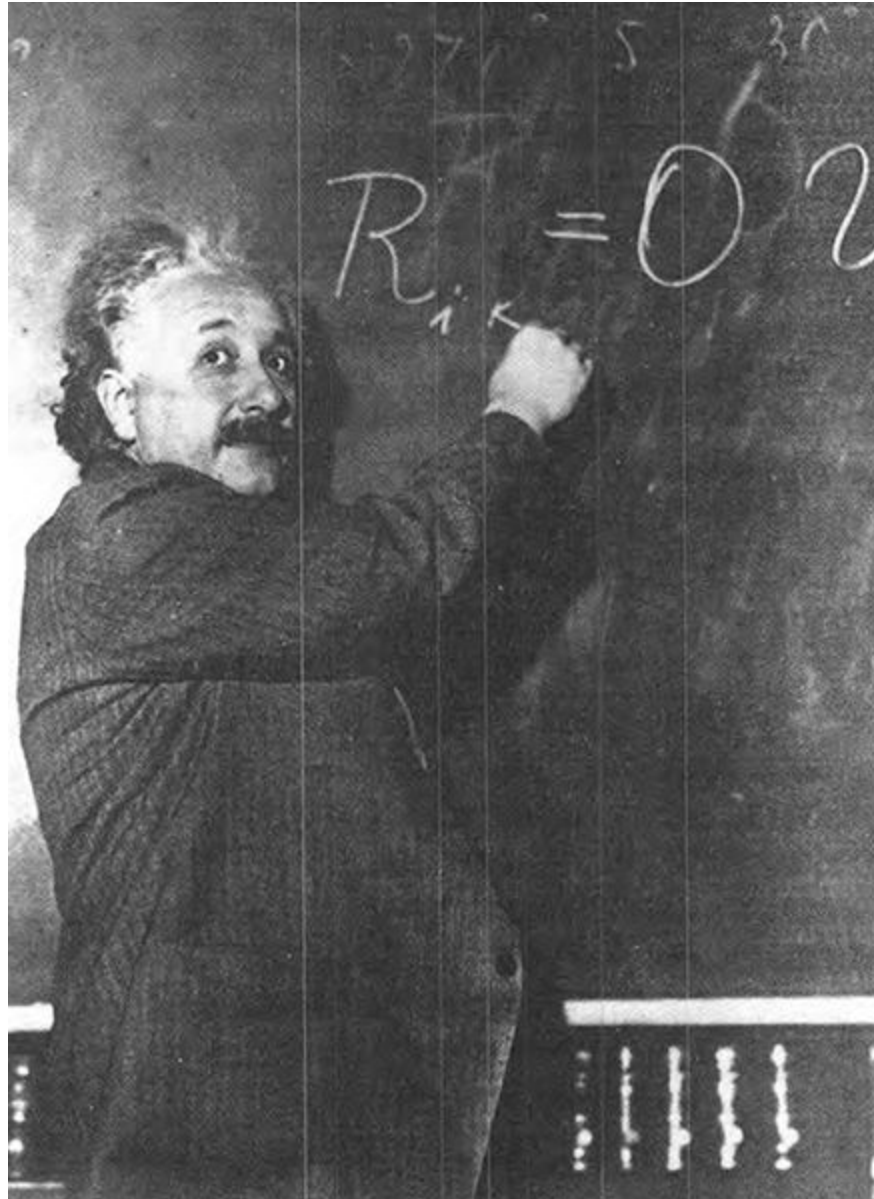
Toute entrevue avec le sublime rend dérisoire le provisoire. Dans notre esprit, l'adamantin fraie mal avec le bref. Or il

existe dans la vie de chacun des moments qui font toucher du doigt l'éternel, ces instants magiques dont Kierkegaard disait qu'ils sont la pénétration de l'éternité dans le temps ; comme si l'éternité, qu'on rejette souvent « après le temps », était en réalité en sommeil au fond du présent ; comme si ce qui dure toujours était davantage lié au furtif qu'au définitif, à l'éclat qu'à la constance. Ces fugitifs moments d'éternité, même s'ils sont rares, suffisent à nous donner l'intuition du non-temps. Ce sont eux qui, ensuite, alimentent soupirs et mélancolies, et tous les manques causés par la finitude des êtres et des choses.

Lors de pareilles fulgurances, le temps cesse provisoirement son travail de broyage. Il se laisse épouser, se donne en offrande, devient amical. Aussi curieux que cela puisse paraître, on trouve même des physiciens illustres (pour rester dans notre sujet) qui ont avoué avoir connu de telles plongées au cœur du temps. C'est le cas d'Erwin Schrödinger, le père de l'équation portant son nom. Ce physicien étonnant, qui savait ne pas se contenter d'une approche exclusivement physicienne des grandes questions, avait compris que le temps est quelque chose qui se médite plutôt qu'un objet à conceptualiser. Il expliquait que, pour éprouver l'intemporel, il suffit d'une circonstance qui, sans suspendre le temps, vient simplement nous faire adhérer au présent en le faisant flamber, en portant sa densité à l'absolu ; d'une situation qui nous fait entrer dans le recueillement de l'essence, nous porte hors du temps en l'or du temps, nous pose en son centre arrêté. Selon Schrödinger, pour que la vie se livre ainsi à l'extrême, il peut suffire d'un baiser (comme quoi les grands physiciens ne sont pas tous de purs esprits) : « Aimez une fille de tout votre cœur, nous conseille-t-il en guise de méthode, et embrassez-la sur la bouche : alors le temps s'arrêtera, et l'espace cessera d'exister. » L'amour est donc bien placé pour narguer le temps. Du moins trouve-t-on des écrivains et des savants qui s'accordent sur ses capacités à nous libérer

de la tyrannie du « vieux Cronos ». Cette rare œcuménicité est assurément un bon indice.

Certaines réflexions soustraient au temps, d'autres y ramènent. Lorsque nous entendons fredonner que « les feuilles mortes se ramassent à la pelle », nous sommes pris à notre insu de mélancolie lancinante. Le temps devient manque, et nous plongeons lentement dans le *blues* de l'automne. L'automne, c'est toujours la fin de quelque chose, qui évoque notre propre fin. En revanche, lorsque nous voyons écrit que, en géométrie plane, la somme des carrés des côtés d'un triangle est égale au carré de l'hypoténuse, nous n'éprouvons rien de tel. Nous sommes alors en présence d'un théorème, en l'occurrence celui de Pythagore, dont la portée est minuscule, mais dont la validité est à l'abri des aléas de la vie ordinaire. Sa vérité défie le temps, fait des pieds de nez à la conjoncture et méprise tout ce qui ressemble à un changement. Les scientifiques, rêvant d'une liberté de l'esprit par rapport au temps, aspirent à produire beaucoup d'autres énoncés de ce type, qui soient tout aussi durables. Suivant en la circonstance Aristote, Platon, et aussi Spinoza pour lequel « il est de la nature de la raison de percevoir les choses comme possédant une certaine sorte d'éternité », ils ont tendance à confondre l'intelligible avec l'éternel. Aussi la découverte scientifique est-elle vécue, à l'instar de la création artistique, comme un antidestin. N'est-ce pas au nom d'un dépassement de sa propre condition que l'homme traque des lois qui ne s'usent pas, cherche des énoncés définitifs, bref, fait de la science ?



Einstein au tableau.

N'est-ce pas pour sublimer sa propre condition de mortel que l'homme rêve d'équations définitives, traque des lois qui ne s'usent pas, bref, fait de la science ?

Parce qu'elle porte à confondre l'intelligible avec l'éternel, la science est souvent vécue comme un antidestin.

Ph. © FPG International/Explorer.

S'il taquine si assidûment l'intemporel, n'est-ce pas pour échapper à l'éphémère qui l'entoure ? Reste que ses essais héroïques pour s'arracher aux lois inexorables de la nature

et du temps font indéniablement sa grandeur, d'autant que ceux-ci sont peut-être vains. Rien ne garantit en effet que le temps n'est pas l'ultime triomphateur, et qu'il ne se rit pas des conquêtes de l'esprit.

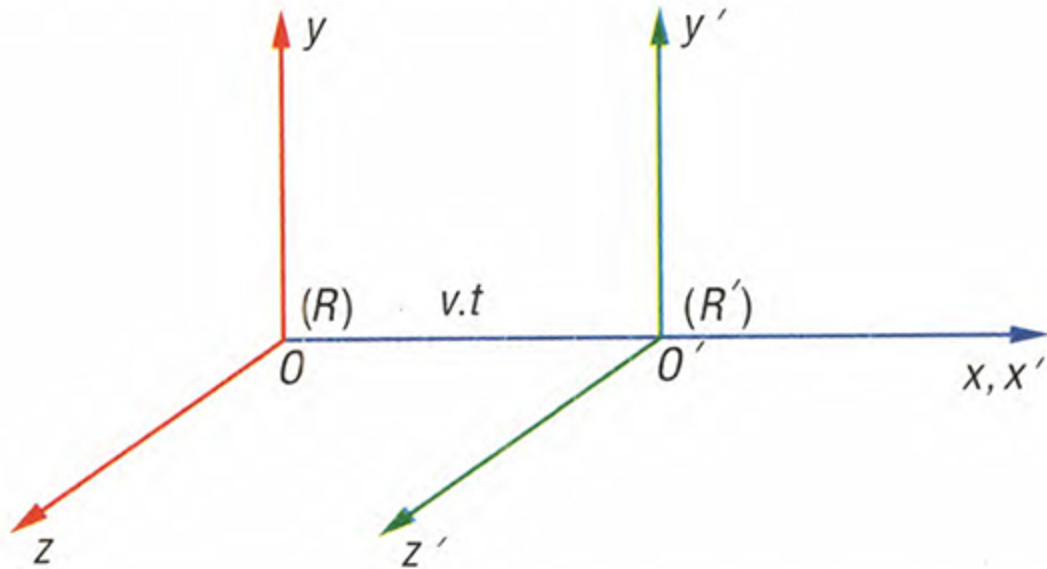
L'éphémère et l'intemporel sont deux aspects du temps qui s'entrelacent et se complètent en un mélange bâtard. Se supposant et se réclamant l'un l'autre, ils sont sans nul doute les deux faces de notre temporalité humaine, comme l'avvers et l'envers d'une seule et même réalité. Tout comme les physiciens, nous sommes dans la vie de tous les jours ballottés entre Parménide et Heraclite : un œil regardant le temps, l'autre se tournant vers l'éternité. Il semble que nous ne pouvons pas expliquer le changeant sans le ramener au permanent ; nous ne savons pas raconter la durée sans imaginer qu'elle monnaie quelque invariance ; nous ne sommes pas à même de dire le temps sans penser en même temps l'éternité, et réciproquement. Comme si le temps, dans notre esprit, était toujours en collusion étroite avec ce qui le transcende.

*Sceaux, le 28 août 1994,
jour de la Saint-Augustin*

ANNEXE

Le temps élastique de la relativité

Soit R et R' , deux référentiels galiléens (et donc en mouvement de translation rectiligne et uniforme l'un par rapport à l'autre), d'origines respectives O et O' . Les coordonnées qui repèrent un événement dans R sont du type (x, y, z, t) . Les trois premières indiquent la position où a lieu l'événement, la quatrième indique l'instant où il se produit. Soit (x', y', z', t') les coordonnées de ce même événement dans R' . Comment s'expriment-elles en fonction de x, y, z, t , les coordonnées dans R ?



Les référentiels R et R'.

Le référentiel R' est en translation rectiligne et uniforme par rapport au référentiel R , avec une vitesse v .
La distance OO' est égale à $v.t$.

Supposons que le mouvement de translation de R' par rapport à R se fasse selon l'axe Ox et soit sa vitesse. La transformation de Lorentz qui permet de relier les coordonnées dans R aux coordonnées dans R' est alors donnée par :

Dans ces expressions, c désigne la vitesse de la lumière dans le vide, β est égal au rapport v/c et γ vaut $1/(1-\beta^2)^{1/2}$.

La vitesse de la lumière étant une vitesse limite, c'est-à-dire indépassable, β ne peut pas être plus grand que 1. Le facteur γ , lui, est toujours supérieur à 1.

Pour voir comment ces équations fonctionnent, considérons d'abord deux événements simultanés dans R , c'est-à-dire se produisant au même instant t . Leurs coordonnées dans R sont respectivement (x_1, y_1, z_1, t) et (x_2, y_2, z_2, t) . Voyons s'ils sont aussi simultanés dans R' . Compte tenu de ce qui est écrit plus haut, les instants t'_1 et t'_2 auxquels ils se produisent dans R' sont donnés par :

On voit que si x_1 est différent de x_2 , t'_1 et t'_2 ne sont pas égaux. Deux événements simultanés dans R ne le sont plus dans R'. Le concept de simultanéité n'est donc pas absolu (rappelons qu'il l'était en physique newtonienne). C'est une des grandes leçons de la théorie de la relativité.

Dans R, l'intervalle d'espace-temps Δs qui sépare deux événements repérés par les indices 1 et 2 est défini par :

Dans R', l'intervalle d'espace-temps est donné par :

En utilisant les expressions de la transformation de Lorentz donnant x'_1 en fonction de x_1 et t_1 , x'_2 en fonction de x_2 et t_2 , t'_1 en fonction de t_1 et x_1 etc., on montre très facilement que $(\Delta s')^2$ est égal à $(\Delta s)^2$. Ce résultat est capital. Il signifie que l'intervalle d'espace-temps entre deux événements est indépendant du référentiel galiléen dans lequel on le calcule. On dit que Δs est un *invariant de Lorentz*.

Voyons maintenant les conséquences de cette invariance lorsqu'on l'applique au cas du muon, particule instable de durée de vie τ égale à $2,2 \cdot 10^{-6}$ seconde. Dans un premier temps, plaçons-nous dans le référentiel propre R du muon. Par définition, le muon est immobile dans ce référentiel, sa position coïncidant en permanence avec l'origine O du référentiel. Soit t_1 l'instant de sa naissance (où il est produit par désintégration d'un pion) et t_2 celui de sa désintégration en un électron et deux autres particules (des neutrinos). Par définition, on a $t_2 - t_1 = \tau$. L'intervalle d'espace-temps qui sépare la naissance de la mort du muon se réduit donc à :

Si l'on se place maintenant dans un autre référentiel R' où le muon se déplace avec une vitesse v le long de l'axe des x , l'intervalle d'espace-temps entre la naissance et la mort d'un muon est donné par :

x'_1 et x'_2 désignant dans R' les positions du muon à sa naissance et à sa mort, et t'_1 et t'_2 les instants où l'une et l'autre ont lieu. $(\Delta s)^2$ étant un invariant de Lorentz, on a :

Soit ici : Puisque, cela donne :

Le facteur γ étant plus grand que 1, la durée de vie $\Delta t'$ du muon mesurée depuis un référentiel par rapport auquel il est en mouvement est toujours plus grande que sa durée de vie propre τ . Cela est d'autant plus vrai que sa vitesse dans ce référentiel est plus élevée.

On parle à ce propos d'une « élasticité » du temps. Même si cette élasticité rappelle ce que nous avons dit du temps subjectif (*tempus*), elle concerne bien là le temps objectif (*chronos*), celui qui est mesuré par les horloges. Une horloge en mouvement bat toujours plus lentement qu'une horloge au repos, et plus sa vitesse tend vers celle de la lumière, plus ses battements ralentissent. À la limite, pour le photon, qui est la particule de lumière, le temps ne s'écoule plus. Le photon a la chance de ne pas vieillir, puisque son temps propre est figé (Δs est nul pour $v = c$).

Cette élasticité du temps de la relativité est à l'origine du paradoxe des jumeaux de Langevin, cité dans le texte. La théorie de la relativité rendant parfaitement compte de ce paradoxe, il ne vaut que pour le sens commun.

GLOSSAIRE

Big-bang : modèle actuellement admis de l'évolution cosmique, d'après lequel l'univers a d'abord connu des conditions de température et de densité très élevées, qui se sont atténuées au cours de son expansion. Le terme est souvent utilisé de façon abusive pour décrire une création explosive de l'univers.

Big-crunch : scénario symétrique de celui du big-bang, qui pourrait se produire si la phase actuelle d'expansion de l'univers était suivie d'une phase de contraction aboutissant à des conditions de température et de densité très élevées.

Conjugaison de charge : c'est l'opération formelle qui consiste à transformer une particule en son antiparticule.

Cosmologie : étude de la structure et de l'évolution de l'univers, considéré dans son ensemble. Aucune expérience n'ayant été conduite, ni ne pouvant être conduite sur la totalité du monde en tant que telle, la cosmologie a recours à des hypothèses et à des extrapolations qui sont au cœur d'intenses débats.

Entropie : grandeur thermodynamique, relative à un corps macroscopique, correspondant intuitivement au degré de désordre du système. L'entropie permet de mesurer quantitativement la « qualité » de l'énergie. Le second principe de la thermodynamique postule que, pour un système isolé, l'entropie ne peut que croître.

Expansion de l'univers : les galaxies s'éloignent les unes des autres à une vitesse d'autant plus grande qu'elles sont distantes. Une telle dynamique correspond à une expansion globale de l'Univers.

Flèche du temps : métaphore, inventée par le physicien anglais Arthur Eddington, pour signifier la fuite inexorable du temps, du passé vers l'avenir, c'est-à-dire en sens unique.

Fonction d'onde : entité mathématique, souvent notée Ψ (*psi*), dont la physique quantique se sert pour décrire l'état physique des systèmes qu'elle traite.

Formalisme : ensemble de principes, d'équations mathématiques, de règles opératoires, qui, mis ensemble, bâtissent une théorie et indiquent ses modalités d'application.

Isotrope : qui présente les mêmes propriétés physiques dans toutes les directions spatiales, de sorte qu'aucune de ces directions ne peut être formellement privilégiée.

Localité : au sens commun du terme, un objet est dit localisé s'il est confiné à l'intérieur d'une petite région. Il existe en outre un « principe de localité », lié à la théorie de la relativité. Selon cette dernière, aucun signal ne peut se propager plus vite que la vitesse de la lumière. Il y a donc des cas où l'on peut être certain que, de deux événements, aucun n'influence l'autre. C'est lorsque ces deux événements sont si lointains dans l'espace et si rapprochés dans le temps que la lumière n'a pas le temps de les relier. Ils se passent donc « chacun dans leur coin ».

Loi universelle : partant de l'hypothèse que l'Univers existe et est unique, on peut concevoir qu'il existe des lois physiques universelles, valables partout et s'appliquant à n'importe quelle partie de l'Univers.

Mécanique : branche de la physique qui calcule les mouvements d'un système de corps en connaissant les forces qui s'exercent sur eux, ou inversement qui détermine les forces qui agissent en connaissant le mouvement et la

position des corps. La mécanique newtonienne (classique) s'applique lorsque les vitesses sont très petites devant celle de la lumière. Sinon, il faut avoir recours à la mécanique relativiste. Dans le domaine atomique ou subatomique (particules), de nouvelles lois, très différentes, entrent en jeu. Ce sont celles de la mécanique quantique.

Oxymoron : figure de style de la rhétorique qui allie, contrairement au pléonasme, deux mots contradictoires. Exemples : nuit blanche, ignorance encyclopédique, obscure clarté, cassoulet allégé...

Parité : la parité est l'opération qui consiste à regarder l'image dans un miroir d'un processus physique. On dit qu'il y a invariance par parité si l'image ainsi obtenue est régie par les mêmes lois dynamiques que le processus de départ.

Principe de superposition : en physique quantique, les systèmes physiques sont décrits par des fonctions d'onde, qui ont la particularité de pouvoir se superposer, c'est-à-dire qu'elles peuvent s'additionner : si Ψ_1 et Ψ_2 sont deux états possibles d'un système, $\Psi_1 + \Psi_2$ est *aussi* un état possible du système.

Référentiel : un référentiel sert à situer dans le temps et dans l'espace un événement, telle l'apparition ou la disparition d'une particule. Pour cela, il faut une horloge et trois axes de coordonnées. Un événement est fixé par quatre nombres. Le premier donne la date, les trois autres donnent le lieu.

Référentiel d'inertie : Un référentiel est d'inertie si on y vérifie le principe d'inertie, c'est-à-dire si tout corps isolé (sur lequel aucune force n'agit) y suit un mouvement rectiligne et uniforme.

Système chaotique : système dont l'évolution est imprédictible, bien qu'elle soit régie par des équations censées la déterminer.

Thermodynamique : branche de la physique qui étudie les relations entre l'énergie thermique et l'énergie mécanique,

c'est-à-dire les transferts de chaleur et de mouvement. Elle fut fondée au milieu du XIX^e siècle, sur des bases établies par Sadi Carnot en 1824.

Topologie : branche des mathématiques qui s'intéresse aux propriétés globales des espaces qui restent insensibles aux déformations continues qu'on peut leur appliquer, telles que leur caractère fini ou infini. La droite et le cercle n'ont pas les mêmes propriétés topologiques.

Trou noir : objet céleste extrêmement dense, dont l'existence est compatible avec les principes de la théorie de la relativité générale. Il courbe tant l'espace-temps autour de lui que la lumière qu'il émet ne peut pas s'échapper. Un trou noir est par définition invisible. Il pourrait cependant être détectable grâce au rayonnement produit par la matière qui, inexorablement, s'y engouffre.

BIBLIOGRAPHIE

Première partie

BERGÉ, Y., POMEAU, Y., DUBOIS-GANCE, M., *Des rythmes au chaos*, Odile Jacob, 1994.

COHEN-TANNOUDJI, G., SPIRO, M., *Matière-Espace-Temps*, Gallimard, 1990.

D'ESPAGNAT, B., *Le Réel voilé* (en particulier l'appendice 3), Fayard, 1994.

D'ESPAGNAT, B., KLEIN, É., *Regards sur la matière*, Fayard, 1993.

HAWKING, S., *Une brève histoire du temps*, Flammarion, 1988, J'ai Lu, 1992.

JAFFELIN, J., *Le Promeneur d'Einstein*, Le Cerf, 1991.

KLEIN, É., SPIRO, M. (dir.), *Le Temps et sa flèche*, Frontières, 1994.

PRIGOGINE, I., STENGERS, I., *La Nouvelle Alliance*, Gallimard, 1986.

PRIGOGINE, I., STENGERS, I., *Entre le temps et l'éternité*, Flammarion, 1992.

Seconde partie

BACHELARD, G., *L'Intuition de l'instant*, Stock, 1993, LGF, 1994.

BERGSON, H., *Durée et Simultanéité*, PUF, coll. « Quadrige », 1992.

BESNIER, J.-M., *L'Humanisme déchiré*, Descartes & Cie, 1993.

BOUTANG, P., *Le Temps : essai sur l'origine*, Hatier, 1993.

CONCHE, M., *Temps et Destin*, PUF, 1992.

DESANTI, J.-T., *Réflexions sur le temps*, Grasset, 1992.

GRIMALDI, N., *Ontologie du temps*, PUF, 1993.

GUITTON, J., *Justification du temps*, PUF, coll. « Quadrige », 1993.

JONAS, H., *Le Principe responsabilité*, Le Cerf, 1990.

KELEN, J., *L'Éternel Masculin*, Laffont, 1994.

LEVINAS, É., *Le Temps et l'Autre*, PUF, coll. « Quadrige », 1994.

PIETTRE, B., *Philosophie et Science du temps*, PUF, coll. « Que sais-je ? », 1994.

VACQUIN, M. (sous la direction de), « La responsabilité », *Autrement*, série « Morale », janvier 1994.

Références des citations

[Gaston Bachelard](#), *L'Intuition de l'instant*, Stock, 1992, p. 13.

[Michel Serres](#), « Temps », dans *Redécouvrir le temps*, Éditions de l'université de Bruxelles, 1988, p. 302.

[Héraclite](#), B XCI, dans *Les Présocratiques*, Gallimard, coll. « Bibliothèque de la Pléiade », 1989, p. 167.

[Primo Levi](#), « Échec au temps », dans *Le Fabricant de miroirs*, Le Livre de poche, coll. « Biblio », 1989.

[Pierre Simon](#), marquis de Laplace, *Essai philosophique sur les probabilités*, Courcier, Paris, 1814.

[Henri Bergson](#), *L'Évolution créatrice* (1916), PUF, 1970, p. 341.

[Blaise Pascal](#), *Pensées*, Opuscules, III, De l'esprit géométrique.

[Saint Augustin](#), *Confessions*, livre XI, Garnier-Flammarion.

[Blaise Pascal](#), *op. cit.*

[Marcel Conche](#), *Temps et Destin*, PUF, 1992.

[Aristote](#), *Physique*, IV, 219b, 12.
[Aristote](#), *Physique*, IV, 11, 218b.
[Emmanuel Kant](#), *Critique de la raison pure*, 1781.
[Louis de Broglie](#), *Physique et Microphysique*, Albin Michel, 1956, pp. 191-211.
[Hans Jonas](#), *Le Principe responsabilité*, Le Cerf, 1990, p. 24.
Ibid., pp. 49 et 54.
[Yves Coppens](#), « Quatre milliards d'années après », dans *Temps, Mémoires, Chaos*, colloques 1990-1992, Descartes & Cie, p. 21.
[Marcel Conche](#), *op. cit.*, p. 15.
[Søren Kierkegaard](#), *Journal*, 1837, édition danoise, tome 2, p. 235.
[Baudelaire](#), *Le Spleen de Paris*, XXXIII, *Énivrez-vous*, Garnier-Flammarion, 1987.
[André Breton](#), *L'Amour fou*, Gallimard, coll. « Folio », 1991, p. 171.
[Shakespeare](#), *Sonnets*, traduction Pierre Jean Jouve, Gallimard, coll. « Poésies », 1975.
[Erwin Schrödinger](#), *Carnet de 1919*, « À propos de philosophie kantienne », cité dans J. Mehra et H. Reichenberg, *The Historical Development of Quantum Theory*, Springer, 1987, p. 409.
[Baruch Spinoza](#), *Éthique*, II, prop. LXIV.

INDEX

Aristote 1, 2, 3, 4.

astrophysique 1.

asymétrie temporelle 1.

Bachelard (Gaston) 1.

Bergson (Henri) 1, 2, 3.

Berkeley (George) 1.

big-bang 1, 2, 3, 4, 5, 6.

big-crunch 1, 2.

Boltzmann (Ludwig) 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7.

Carnot (Sadi) 1, 2.

causalité (principe de) 1, 2, 3.

Comte (Auguste) 1.

constantes fondamentales 1, 2.

cosmologie 1, 2, 3, 4, 5.

Eddington (Arthur) 1, 2.

Einstein (Albert) 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16.

entropie 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7.

environnement 1.

espace-temps 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14.

éthique (de l'avenir) 1.

flèche du temps [1](#), [2](#), [3](#), [4](#), [5](#), [6](#), [7](#), [8](#), [9](#), [10](#), [11](#).

fonction d'onde [1](#), [2](#), [3](#), [4](#), [5](#), [6](#).

Fourier (Joseph) [1](#).

Galilée [1](#), [2](#).

gravitation [1](#), [2](#), [3](#).

Héraclite [1](#), [2](#), [3](#), [4](#).

Hume (David) [1](#), [2](#).

irréversibilité [1](#), [2](#), [3](#), [4](#), [5](#), [6](#), [7](#), [8](#), [9](#), [10](#), [11](#), [12](#), [13](#), [14](#), [15](#), [16](#), [17](#).

Jankélévitch (Vladimir) [1](#).

Jonas (Hans) [1](#), [2](#), [3](#), [4](#), [5](#).

Kant (Emmanuel) [1](#), [2](#), [3](#).

Langevin (Paul) [1](#), [2](#), [3](#), [4](#).

Laplace (Pierre Simon, marquis de Laplace) [1](#).

Leibniz (Gottfried Wilhelm) [1](#), [2](#).

Mach (Ernst) [1](#), [2](#).

mécanique (classique) [1](#), [2](#), [3](#), [4](#), [5](#), [6](#), [7](#).

mécanique (quantique) [1](#), [2](#), [3](#), [4](#), [5](#), [6](#), [7](#), [8](#), [9](#), [10](#), [11](#).

métaphysique [1](#), [2](#), [3](#).

mort [1](#), [2](#), [3](#), [4](#), [5](#), [6](#), [7](#).

Newton (Isaac) [1](#), [2](#), [3](#), [4](#), [5](#), [6](#), [7](#), [8](#), [9](#), [10](#), [11](#).

Nietzsche (Friedrich) [1](#).

paramètre t [1](#).

parité (conservation de la) [1](#), [2](#).

Parménide [1](#), [2](#), [3](#), [4](#), [5](#).

Pascal (Blaise) [1](#), [2](#).

Philon d'Alexandrie [1](#).

physique [1](#), [2](#), [3](#), [4](#), [5](#), [6](#), [7](#), [8](#), [9](#), [10](#), [11](#), [12](#), [13](#), [14](#).

physique (des particules) [1](#).

physique (newtonnienne) [1](#).

physique (quantique) [1](#), [2](#), [3](#), [4](#).

Planck (constante de) [1](#), [2](#).

Platon [1](#), [2](#).

Poincaré (Henri) [1](#), [2](#).

Prigogine (Ilya) [1](#), [2](#), [3](#), [4](#), [5](#), [6](#).

relativité [1](#), [2](#), [3](#), [4](#), [5](#), [6](#), [7](#), [8](#), [9](#), [10](#), [11](#), [12](#), [13](#), [14](#), [15](#).

relativité générale [1](#), [2](#), [3](#), [4](#), [5](#), [6](#).

relativité restreinte [1](#), [2](#), [3](#), [4](#), [5](#), [6](#), [7](#), [8](#).

réversibilité [1](#), [2](#), [3](#), [4](#).

Saint Augustin [1](#), [2](#), [3](#), [4](#), [5](#), [6](#).

Schrödinger (équation de) [1](#), [2](#), [3](#), [4](#), [5](#), [6](#).

symétrie temporelle [1](#).

système chaotique [1](#).

temps (universalité du) [1](#).

temps newtonien [1](#), [2](#), [3](#), [4](#), [5](#), [6](#).

thermodynamique [1](#), [2](#), [3](#), [4](#), [5](#), [6](#), [7](#), [8](#).

topologie (du temps) [1](#).

trous noirs [1](#).

Vinci (Léonard de) [1](#).

vitesse de la lumière (c) [1](#), [2](#), [3](#), [4](#), [5](#), [6](#), [7](#), [8](#), [9](#), [10](#).

TABLE

Avant-propos

LA PHYSIQUE ET LE TEMPS

Chronos et tempus

Temps modernes recherchent unité, désespérément...

EXERCICES DE TEMPS

Le temps de la connaissance

Le temps de l'action

Annexe

Glossaire

Bibliographie

Index



F l a m m a r i o n